



# **VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## **FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## **ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

## **PROAKTIVNÍ SYSTÉM ÚDRŽBY STROJŮ**

PROACTIVE MACHINE MAINTENANCE SYSTEM

### **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

### **AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Petr Semotam**

### **VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.**

**BRNO 2016**



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Student: **Petr Semotam**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Proaktivní systém údržby strojů

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Firma SMC Industrial Automation CZ s.r.o. Vyškov se zabývá výrobou, distribucí a servisem pneumatických prvků i prvků pro průmyslovou automatizaci. V současné době se zaměřuje ve svých provozech na rozvoj systémů údržby obráběcích strojů, které vychází z výsledků technické diagnostiky

#### Cíle bakalářské práce:

V bakalářské práci se soustředíte na následující cíle:

1. Pojednejte obecně o údržbě a diagnostice se zaměřením na stroje obráběcí.
2. Soustředte se na výběr vhodných metod technické diagnostiky pro posouzení stavu obráběcího stroje s ohledem na provoz ve firmě SMC Industrial Automation CZ s.r.o. Vyškov.
3. Vytvořte návrh systému proaktivní údržby obráběcích strojů v uvedené firmě.
4. Navrhněte metodiku měření.
5. Realizujte vybraná diagnostická měření.
6. Dosažené výsledky řešení úkolů 1 -5 posuďte s ohledem na vytvořený proaktivní systém údržby (dle bodu 3.) pro firmu SMC Industrial Automation CZ s.r.o. Vyškov, navrhněte další postup a doporučení v řešení dané problematiky.

#### Seznam literatury:

Vorlíček, Z. (1991): Spolehlivost a diagnostika výrobních strojů. České vysoké učení technické, Praha.  
Kreidl, M., Šmíd, R. (2006): Technická diagnostika. Senzory-metody-analýza signálu. BEN - technická literatura, Praha.

Helebrant, F., Ziegler, J. (2005): Technická diagnostika a spolehlivost, II. Vibrodiagnostika. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava.


Mykiska, A. (2006): Bezpečnost a spolehlivost technických systémů. České vysoké učení technické v Praze, Praha.


Legát, V. (2013): Management a inženýrství údržby. Kamil Mařík PBTisk, Příbram.

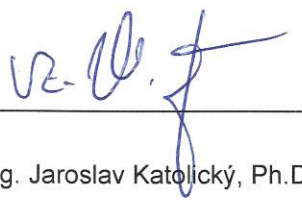
Grenčík, J. (2013): Manažérstvo údržby - Synergia a teorie a praxe. Slovenská spoločnosť údržby, BEKI design,s.r.o., Košice.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 30. 11. 2015

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

  
L. S.

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan

## ABSTRAKT

Tato práce řeší problematiku proaktivního systému údržby se zaměřením na obráběcí stroje. Jsou zde popsány nejčastější poruchy a nejrozšířenější diagnostické metody obráběcích zařízení.

V práci je popsán postup analýzy způsobů, důsledků a kritičnosti poruch FMEA/FMECA, její možný další budoucí vývoj, a to s názornou ukázkou aplikace této analýzy na automatický soustruh CNC. Dále je v praktické části vybrána, popsána a vyhodnocena vibrační diagnostika obráběcího zařízení. Následně je doporučen postup v oblasti řešení zavádění systému údržby ve firmě SMC Industrial Automation CZ s.r.o. Vyškov.

## ABSTRACT

This bachelor thesis concerns issues of proactive maintenance, which is focused on machine tools. The most common failures and the most widespread methods of diagnostics of machine tools are described in the thesis.

There are also described the procedure of Failure mode, effects and criticality analysis FMEA/FMECA, its possible development in the future with demonstrative presentation of application this analysis on CNC automatic lathe. Subsequently, in the practical part there has been chosen, described and appraised diagnostic of vibrations. Prior to the end the process in field of solving of establishment systems of maintenance has been recommended for SMC Industrial Automation CZ LLC Vyškov.

## KLÍČOVÁ SLOVA

proaktivní systém údržby, údržba strojních zařízení, komplexní produktivní údržba, TPM, prediktivní údržba, preventivní údržba, provozní spolehlivost, poruchy obráběcích strojů, analýza způsobů a důsledků poruch, FMEA, FMECA, ERP, diagnostika obráběcích zařízení, určení technického stavu, vibrodiagnostika

## KEYWORDS

proactive maintenance, maintenance of machine tools, total productive maintenance, TPM, predictive maintenance, preventive maintenance, operational reliability, failures of machine tools, failure mode, effects and criticality analysis, FMEA, FMECA, ERP, diagnostics of machine tools, determination of technical condition, diagnostic of vibrations



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEMOTAM, P. *Proaktivní systém údržby strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 69 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Miloš Hammer, CSc..





## PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří doc. Ing. Miloši Hammerovi, CSc za trpělivé a přínosné vedení bakalářské práce. Dále za velmi cenné odborné rady a vstřícnost při konzultacích.

Děkuji firmě SMC Industrial Automation CZ s.r.o. ve Vyškově za poskytnutí příležitosti vypracovávat ve svém provozu praktickou část bakalářské práce.

Dále mé poděkování směřuje rodině za jejich veškerou podporu v průběhu studia.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Miloše Hammera, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. 05. 16

.....

Petr Semotam



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>ÚDRŽBA OBRÁBĚCÍCH STROJŮ.....</b>	<b>17</b>
2.1	Poruchy obráběcích strojů .....	19
2.1.1	Analýza spolehlivosti CNC obráběcích strojů v raném období provozu .....	19
2.1.2	Analýza poruchových dat obráběcích strojů .....	21
2.2	Metoda FMEA/FMECA.....	23
2.2.1	Uplatnění konceptu exponenciálního přístupu pro zvýšení hodnotící schopnosti FMEA .....	26
2.3	Proaktivní systém údržby .....	27
2.3.1	Konvekční strategie údržby .....	28
2.3.2	Údržba podle technického stavu .....	28
2.3.3	Komplexní produktivní údržba TPM .....	28
<b>3</b>	<b>DIAGNOSTIKA OBRÁBĚCÍCH ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>30</b>
3.1	Diagnostické metody obráběcích zařízení.....	31
3.1.1	Měření kruhové interpolace .....	32
3.1.2	Laserová interferometrie .....	33
3.1.3	Vibrodiagnostika .....	34
<b>4</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>40</b>
4.1	SMC Industrial Automation CZ s.r.o.....	40
4.1.1	Současný stav údržby v SMC Vyškov .....	41
4.1.2	Automatický soustruh CNC .....	44
4.2	FMEA automatického soustruhu CNC .....	45
4.3	Vibrodiagnostika automatického soustruhu CNC .....	55
4.4	Další postup a doporučení v oblasti řešení problematiky údržby v SMC.....	58
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM SYMBOLŮ, ZKRATEK, OBRÁZKŮ A TABULEK .....</b>	<b>64</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>69</b>



# 1 ÚVOD

Před druhou světovou válkou byly výrobní stroje obecně velice robustní stavby s pomalým chodem. Jejich náročnost jak na výrobu, tak i pozdější opravu v případě poruchy nebyla vysoká. Proto byla údržba z počátku převážně represivního charakteru, kdy se vše odvíjelo od skutečnosti, že k poruše při tomto způsobu provozu zákonitě dochází a údržba pak řeší následky.

Takto zkonstruované stroje byly spolehlivé a i dnes lze nalézt celou řadu těchto zařízení, které i přes svoji dlouhotrvající náročnou práci v minulosti jsou stále v dobrém stavu.

Přibližně od roku 1950 probíhala průmyslová přestavba, kdy se z důvodu navyšujících nákladů na práci více a více zaváděla postupná mechanizace a automatizace např. výrobních procesů. Výrobní stroje začínaly mít lehčí konstrukce, rychlejší chod a složitější stavbu. Výskyt poruch byl tak častější, což vedlo především k rozvoji plánované preventivní údržby.

V současné době rozvoj techniky umožňuje rychlou a velmi přesnou výrobu. Konstrukce strojů mají velmi přísné požadavky na zhotovení, které vedou ke snížení provozní spolehlivosti a zvýšení rizika výskytu poruchy. Moderní průmyslová výroba se dá charakterizovat jako vysoce automatizovaná a robotizovaná. To vyžaduje procesní a systémový přístup a maximalizaci provozní spolehlivosti strojních zařízení. Údržba tak již bývá součástí každého podniku.

Často také není výjimkou, že v oblasti údržby se nejedno vedení firmy snaží ušetřit své peníze. Oblast údržby je ale složkou, ve které se každá investice může následně mnohonásobně vrátit.

Bakalářská práce si klade za cíl tento procesní a systémový přístup v podobě konceptu proaktivního systému údržby se zaměřením na obráběcí zařízení popsat včetně náležitostí s ní souvisejících. Popisuje nejčastější poruchy obráběcích zařízení, analýzu způsobů a důsledků poruch FMEA/FMECA a rozšířené diagnostické metody ke zjištění technického stavu obráběcího stroje.

Získané teoretické znalosti jsou uplatněny v praktické části, kde je rozebrán aktuální stav údržby ve firmě SMC Industrial Automation CZ s.r.o. Vyškov, analýza způsobů a důsledků poruch FMEA/FMECA je aplikována na vybraný typ automatického soustruhu CNC a následně je dle dosažených výsledků analýzy vybrána a vykonána diagnostika k určení technického stavu obráběcího zařízení. Praktická část je ukončena navržením a doporučením dalšího postupu v oblasti dané problematiky, resp. systému údržby.



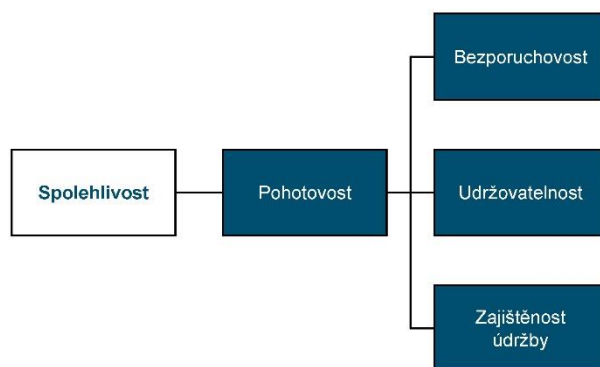


## 2 ÚDRŽBA OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Údržbou se rozumí „Kombinace všech technických, administrativních a manažerských činností během životního cyklu objektu zaměřených na jeho udržení ve stavu nebo jeho navrácení do stavu, v němž může vykonávat požadovanou funkci.“ [1]

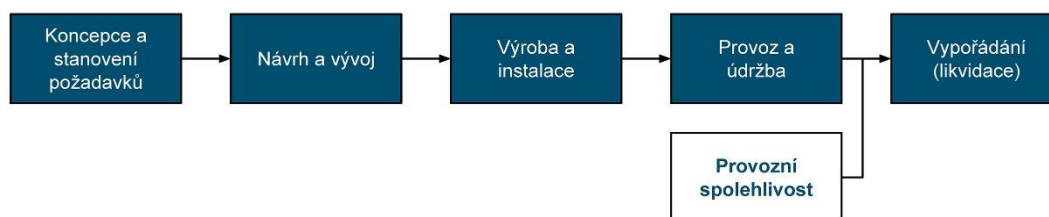
Jak již z definice vyplývá, údržba je nedílnou součástí každého životního cyklu objektu od prvopočátečního stanovení koncepce a požadavků až po koncové vypořádání objektu. Čím více se úvaha údržby s danými etapami (obr. 2) prolíná, tím více se může v rámci životního cyklu objektu dosáhnout určitého stupně spolehlivosti, resp. pohotovosti, jenž je vyjádřena řadou činitelů (obr. 1), jako jsou bezporuchovost, udržovatelnost a zajištěnost údržby.

Dle definice „Spolehlivost je souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují: bezporuchovost, udržovatelnost a zajištěnost údržby.“ [2]



Obr. 1) Definice spolehlivost [2]

Pro systém údržby je obecně nejdůležitější etapou životního cyklu objektu etapa provozu a údržby. Koncový uživatel ve svém zájmu chce, aby objekt setrval ve funkčním stavu, tedy ve stavu, v němž může plnit požadovanou funkci, v co nejdelším časovém horizontu. V této etapě má nejvíce možností jak objekt ovlivnit tak, aby v tomto stavu setrval co nejdéle. Toho se může dosáhnout stanovením správného řízení údržby vzhledem k povaze objektu a daným požadavkům. Zde již přichází termín „provozní spolehlivost“, jenž popisuje dosaženou spolehlivost při provozu objektu či systému vlivem údržby. Resp. popisuje stupeň dosažení pohotovosti, bezporuchovosti, udržovatelnosti a zajištěnosti údržby v etapě provozu, kterého je snaha dosáhnout, udržet a dále zlepšovat.



Obr. 2) Životní cyklus výrobku [3]

Údržba, stejně jako každá prováděná činnost, by se měla řídit stanovenými zásadami. Tyto zásady publikoval autor Pavel Kratochvíl [4] a shrnul je do následujících bodů:

- Pro pravidelně a efektivně prováděnou údržbu je důležité vypracovat časový plán a důsledně setrvávat v jeho dodržování.
- Veškerou vykonanou údržbu stroje včetně závažnějších chybových hlášení je nutné zaznamenávat do provozního deníku.
- Evidovat náhradní díly vedené jako opotřeбенé provozem stroje.
- Jasně specifikovat a označit náplň daného stroje.
- Provedené servisní zásahy spolu s náklady spojenými s odstraněním závady vést v jasném, přehledném a komplexním přehledu.
- Neprodleně odstraňovat zjištěné závady.

Pro udržení objektu ve stavu nebo jeho navrácení do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci resp. pro stanovení správného systému údržby, je velmi důležité v počátečních fázích zavádění určit počáteční stav jednotlivých strojů za pomoci správně zvolené diagnostiky (kapitola 3) a dále vykonání analýzy způsobů a důsledků poruch jim navazující.

K určení takové analýzy může pomoci např. postupy a analýzy metod FMEA, FMECA (kapitola 2.2), analýza stromu událostí ETA<sup>1</sup> či dále např. analýza poruchových stavů FTA<sup>2</sup>. Taková analýza má schopnost především zjednodušit postup v určení částech stroje s vysokým rizikem nebezpečí poruchy a tím docílit zvýšení užité úrovně později aplikovaného systému údržby.

Aby vybraná analýza v korelaci s později stanovenou kombinací technických a administrativních činností měla správnou a úplnou vypovídající úroveň, je bezesporu vhodné mít znalosti o vyskytujících se poruchách a jejich četnostech v rámci celého systému, subsystému a i jednotlivých prvků-komponentů našeho objektu zájmu, tedy obráběcího stroje (kapitola 2.1)

Po určení aktuálního stavu stroje a míst s vysokým rizikem poruchy je účelné dále použít podpůrné nástroje pro správnou a pravidelnou činnost údržby. Tato softwarová řešení posléze se všemi získanými znalostmi mohou poskytnout optimální koncepci údržby (kapitola 4.4).

Veškeré úkony tímto nekončí a je velmi důležité je provádět i po uvedení dané koncepce údržby do života stroje, a to včetně neustálého zlepšování systému údržby, jejich postupů a procesů v celém rozsahu. V tomto může být nápomocný základní princip výkonného systému managementu kvality<sup>3</sup> ISO 9001<sup>4</sup> jako je neustálé zlepšování, resp. PDCA<sup>5</sup> cyklus.

---

<sup>1</sup> Z anglického Event tree analysis, tedy analýza stromu událostí.

<sup>2</sup> Z anglického Fault Tree Analysis tedy analýza stromu poruchových stavů.

<sup>3</sup> Dle definice „Kvalita (jakost) je stupeň splnění požadavků souborem inherentních znaků“ [29]

<sup>4</sup> Norma ISO 9001 specifikuje požadavky na systém managementu jakosti a je určena pro interní aplikaci, pro certifikaci nebo smluvní účely. [10]

<sup>5</sup> Z anglického plan-do-check-act, čili „plánuj, udělej, zkontroluj, jednej“.

## 2.1 Poruchy obráběcích strojů

Definice poruchy je: „Jev spočívající v ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci“ [2]

V této kapitole se budou do poruch řadit i takové jevy, které nemají přímý vliv na funkční plnění požadované funkce a které by svou existencí mohly po určitém časovém úseku způsobit již zmíněnou poruchu dle definice. Jedná se o tzv. provozuschopný stav, kdy „je objekt schopen plnit stanovené funkce a dodržovat parametry provozu stanovené technickou dokumentací“ [1]. Jestliže je v zájmu plnit systém údržby správně, je nutné předcházet poruchám, kdy nám objekt přestane plnit požadovanou funkci, z čehož plyne, že je nasnadě zabývat se i takovými jevy, které by k této události mohly vést.

### 2.1.1 Analýza spolehlivosti CNC obráběcích strojů v raném období provozu stroje

Dále je v práci zmíněn článek napsaný za podpory Národního vědeckého a technologického projektu v Číně a Nadaci Jilin pro vědu a technický rozvoj. Uvedený článek se zabývá poruchami vyskytující se v raném období provozu stroje, nicméně informace, výstupy a závěry nám poskytnou obecný přehled o poruchách CNC<sup>6</sup> strojních zařízení v celé životní etapě provozu a údržby. Autoři Chen Wei<sup>7</sup>, Jiang Bo<sup>8</sup> a Jia Zchicheng<sup>9</sup> zde na základě analýzy FMECA nasbíraných dat o poruchách identifikovali rizikové součásti padesáti CNC obráběcích strojů.

Tradiční metody analýzy poruch pro CNC obráběcí stroje se především zabývají konstantní intenzitou poruch po celou dobu užití stroje. Nicméně značný počet selhání těchto moderních CNC obráběcích strojů často dochází již v počátečních fázích používání. Doba, která je charakterizována abnormálně vysokou poruchovostí, která se v průběhu času postupně snižuje, se nazývá rané období selhávání. Tyto předčasné poruchy jsou pro výrobky (CNC obráběcí stroje) nepřijatelné, protože způsobují další nemalé náklady na zařízení. [5]

Sběr spolehlivostních dat byl proveden prostřednictvím sledování padesáti CNC obráběcích strojů, které se v době sledování teprve nacházely na počátku své provozní etapy. Tento sběr resp. databáze dat je primárně postavena na informacích získaných právě z období raného selhávání. Databáze obsahuje např. dobu vzniku a zániku poruchy, dobu opravy a chybové jevy. Dle záznamů o poruchách bylo zjištěno až sto osmdesát šest záznamů. Pozorované hodnoty byly roztrženy v čase  $t \in [0, 1500]$  hod. ve vzestupném pořadí, dále rozdělené do 10 tříd s délkou 150 hodin tak, jak znázorňuje tab. 1. [5]

<sup>6</sup> Z anglického Computer Numeric Control, tedy obráběcí stroje počítačově číslicově řízené.

<sup>7</sup> Chen Wei z Changchun Academy of Technique and Engineering, Changchun, China

<sup>8</sup> Jiang Bo z Education Academy research Center in Tiexi Block Siping, Jilin, China

<sup>9</sup> Jia Zchicheng z College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun, China

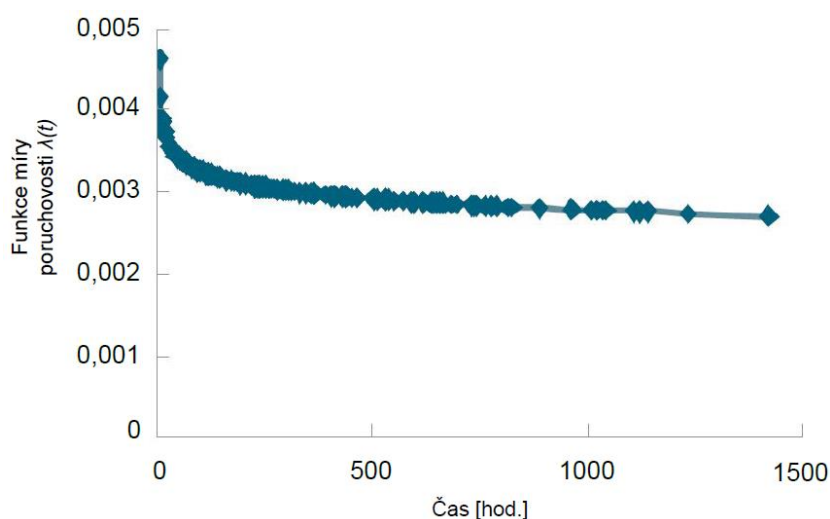
Tab 1) Rozložení frekvence selhání [5]

$j$	třída	střed třídy $x_j^*$	počet poruch	frekvence poruch (relativní četnost)	komulativní absolutní četnost $F_j$
1	0; 150	75	79	0,4247	0,4247
2	150; 300	225	35	0,1882	0,6129
3	300; 450	375	24	0,1290	0,7419
4	450; 600	525	18	0,0968	0,8387
5	600; 750	675	13	0,0699	0,9086
6	750; 900	825	6	0,0323	0,9409
7	900; 1050	975	6	0,0323	0,9731
8	1050; 1200	1125	3	0,0161	0,9892
9	1200; 1350	1275	1	0,0054	0,9946
10	1350; 1500	1425	1	0,0054	1,0000

Nasbíraná data byla za použití statistických metod regresní analýzy a testování hypotéz zpracována. Zjistilo se, že čas mezi počátkem poruch se řídí Weibullovým<sup>10</sup> rozdělením s tvarovým parametrem  $\hat{\beta} = 0,9318$  a parametrem měřítka  $\hat{\alpha} = 309,598$ . Z toho se posléze mohla zjistit funkce hustoty pravděpodobnosti (1) a funkce míry poruchovosti (2). Křivka funkce míry poruchovosti je znázorněna v obr. 3. Je zřejmé, že sledovaná CNC zařízení jsou charakterizována z počátku vysokou, ale dále rychle se snižující poruchovostí. [5]

$$f(t) = \frac{0,9318}{309,598} \left( \frac{t}{309,598} \right)^{-0,0682} \exp \left[ - \left( \frac{t}{309,598} \right)^{0,9318} \right] \quad (1)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} = \frac{0,9318}{309,598} \left( \frac{t}{309,598} \right)^{-0,0682} \quad (2)$$



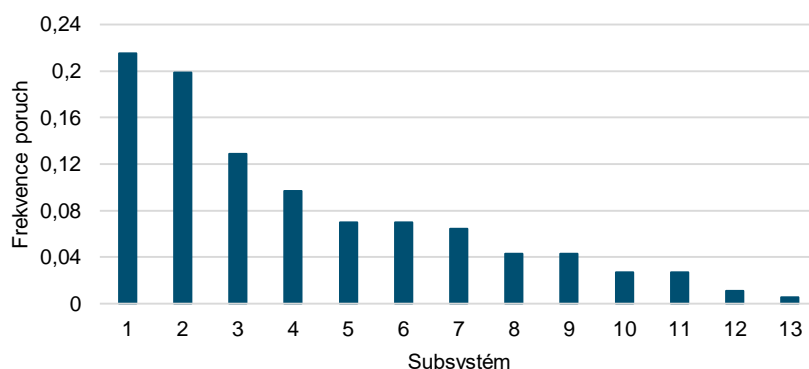
Obr. 3) Křivka funkce míry poruchovosti [5]

<sup>10</sup> Weibullovo rozdělení je vhodným modelem pro úlohy, kdy zkoumáme životnost nějakého zařízení. [30]

Dále se data vypovídající o spolehlivosti jednotlivých komponentů a jejich dalších prvků vynesla do tabulky (tab. 2) a grafu (obr. 4) výskytů poruch, kde se názorně uvedl počet poruch, místo poruchového jevu a jejich frekvence výskytu. Je např. vidět, že elektrické a elektronické systémy a subsystémy s frekvencí poruch 21,51% mají nejvyšší riziko poruchy. Následně jsou to prvky sloužící k přenosu hybných sil (19,89%), komponenty k automatické výměně nástrojů (12,9%) či i samotný CNC systém se svou softwarovou a hardwarovou částí (9,68%).

Tab 2) Výskyt poruch subsystémů [5]

i	subsystém	počet poruch	frekvence poruch
1	Elektrické a elektronické subsystémy	40	0,2151
2	Hlavní přenosy pohybu	37	0,1989
3	Automatická výměna nástrojů	24	0,1290
4	CNC systém	18	0,0968
5	Automatická výměna obrobků	13	0,0699
6	Hydraulický systém	13	0,0699
7	Skříň	12	0,0645
8	Jednotky servořízení	8	0,0430
9	Dopravník třísek	8	0,0430
10	Chladicí systém	5	0,0269
11	Systém mazání	5	0,0269
12	Ochranné kryty	2	0,0108
13	Lože	1	0,0054



Obr. 4) Výskyt poruch subsystémů [5]

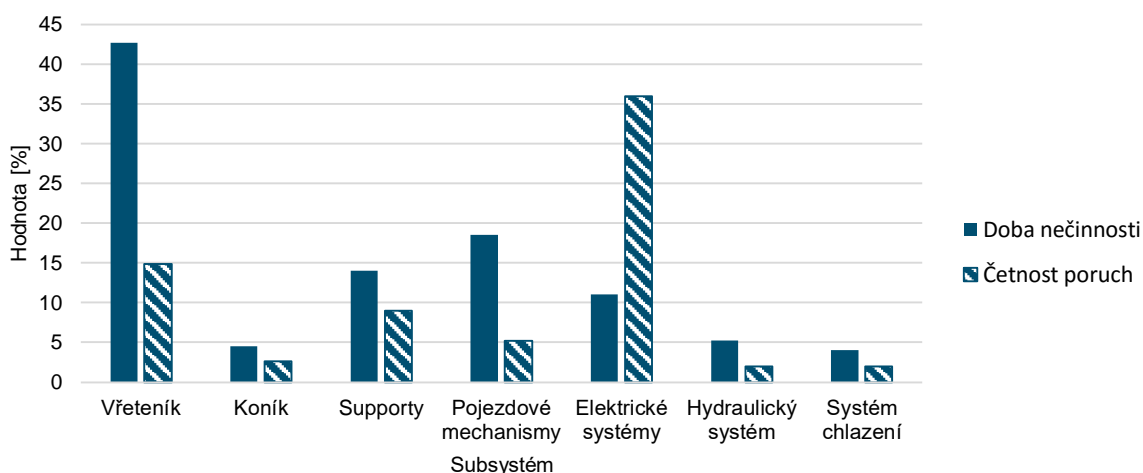
### 2.1.2 Analýza poruchových dat obráběcích strojů

Další článek je napsaný Indickým Institutem Technologie v Novém Dillí. Autoři S.Saravanan, G.S.Yadava a P.V.Rao zde na základě analýzy nasbíraných dat o poruchách identifikovali rizikové subsystémy a prvky obráběcího stroje. Data byla nasbírána v období pěti let na několika konvekčních obráběcích strojích, jako je např. soustruh či frézka. Z práce lze získat potřebné základní povědomí o poruchách a jejich pravděpodobnosti vzniku.

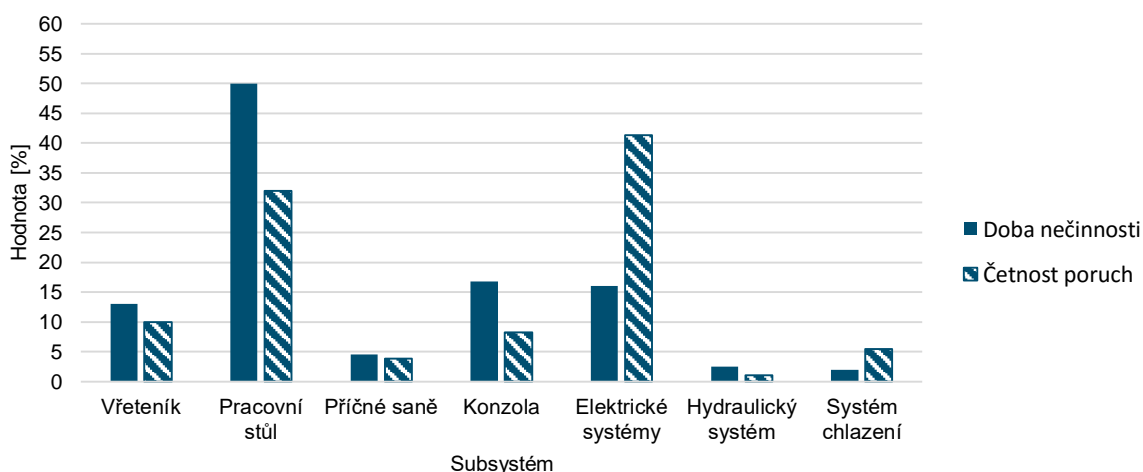
Jak obráběcí stroj soustruh, tak i frézka byly rozřazeny do několika skupin subsystémů, komponentů a součástí. Následně z nasbíraných dat a informací byly za pomoci matematické statistiky vytvořeny dva přehledné grafy vypovídající o četnosti daných poruch a dob nečinnosti v období poruchy, resp. doby do obnovy.

Z obr. 5 lze vyčíst, že nejvyšší počet poruch u soustruhu nastal u elektrických a elektronických systému a subsystémů a součástí vřeteníku, tedy prvků sloužící k přenosu pohybu. Nejdelší doba nečinnosti v období poruchy poté nastal u komponentů vřeteníku a dále pojezdových mechanismů (vodící plocha, tyč, šroub) nebo suportové skříně, supportu a prvků upínání nástroje, tedy např. upínka, otočná nožová hlava nebo čtyřboká vícenástrojová hlava.

U obr. 6 lze vidět, že obdobně jako u soustruhu nejvyšší počet poruch nastal u elektrických a elektronických systémů a pracovního stolu, do jehož subsystému zapadaly motory posuvů či pojezdové mechanismy jako jsou vodící plochy, tyče a šrouby. Subsystém pracovního stolu byl také příčinou nejdelší doby nečinnosti v případě poruchy. Dále to byla konzola, elektrické a elektronické systémy a části vřetena.



Obr. 5) Graf četnosti poruch subsystému a jejich doby do obnovy soustruhu [6]



Obr. 6) Graf četnosti poruch subsystémů a jejich doby do obnovy frézky [6]

Z obou studií se můžou vyvodit určité závěry. Mezi nejrizikovější subsystémy obráběcích zařízení patří elektrické a elektronické systémy, prvky přenosů hybných sil, automatická zařízení pro výměnu rezného nástroje či obrobku a samotný CNC řídicí systém.

## 2.2 Metoda FMEA/FMECA

Metoda FMEA (Failure Mode and Effects Analysis, Analýza způsobů a důsledků poruch) je „Systematický postup analýzy systému za účelem zjištění potenciálních způsobů poruch, jejich příčin a důsledků.“ [7]

Metodou analýzy způsobů a důsledků poruch se zabývá norma ČSN EN 60812.

Historie vývoje metody FMEA je shrnuta v tab. 3.

Tab 3) Historie vývoje metody FMEA [8]

rok	popis
1963	FMEA byla poprvé navržena v leteckém a kosmickém průmyslu.
1965	Armáda USA začala uplatňovat techniku FMEA
1974	Armáda USA zveřejnila SOP <sup>11</sup> FMEA: MIL-STD-1629 <sup>12</sup>
1977	Ford Motor začala používat metodu FMEA
1980	Proběhla revize SOP FMEA: MIL-STD-1629A
1985	Mezinárodní elektrotechnická komise (IEC) vydala SOP FMEA: IEC 812
1993	Ford, Chrysler a General Motor vydali 1. vydání referenčního manuálu FMEA
1995	2. vydání referenčního manuálu FMEA bylo zrevidováno sdružením AIAG <sup>13</sup>
2001	3. vydání referenčního manuálu FMEA bylo zrevidováno sdružením AIAG
2008	4. vydání referenčního manuálu FMEA bylo zrevidováno sdružením AIAG
2008 - dosud	FMEA je považována za důležitou analytickou metodu podle ISO 9000 <sup>14</sup> , ISO/TS 16949 <sup>15</sup> , CE <sup>16</sup> a QS 9000 <sup>17</sup> a je široce používána pro hodnocení rizik a zvyšování kvality v mnoha průmyslových odvětvích

Analýza se nejčastěji provádí v etapě návrhu a vývoje, tedy v předvýrobní etapě stroje. To ale není podmínkou. Analýza se může vytvářet i v např. období provozu a údržby stroje. Metoda se provádí za účelem identifikace rizikových událostí, resp. způsobů poruch s jejich příčinami a důsledky, aby se v pozdějších fázích provozu riziko výskytu snížilo nebo zcela odstranilo.

<sup>11</sup> SOP neboli Standard operating procedure je operační postup pomáhající zvyšovat bezpečnost a provozní účinnost pro tyto druhy organizací: farmaceutické, vládní, výzkumné, energetické organizace a jednotky záchranného systému. [24]

<sup>12</sup> MIL-STD je zkratka pro Military standard neboli normu splňující požadavky Ministerstva obrany USA. [25]

<sup>13</sup> AIAG je zkratka pro Automotive Industry Action Group. AIAG je světově uznávanou organizací, v níž se sdružují dodavatelé a výrobci originálních dílů k projednávání a řešení záležitostí ovlivňujících celosvětový dodavatelský řetězec v automobilovém průmyslu.

<sup>14</sup> Normy řady ISO 9000 neboli ČSN EN ISO 9000 je soubor norem, které shrnují obecně uznávané požadavky na management jakosti a na systém (managementu) jakosti. [31]

<sup>15</sup> ISO/TS 16949 je norma systému managementu kvality pro zvláštní požadavky na používání ISO 9001 v organizacích zajišťujících sériovou výrobu a výrobu náhradních dílů v automobilovém průmyslu. [32]

<sup>16</sup> Značka CE vyjadřuje skutečnost, že výrobce dodržuje, resp. výrobek odpovídá základním požadavkům vyplývajících ze směrnice EU a že výrobce, dovozce, třetí strana atd. provedly všechny příslušné postupy posouzení shody, takže výrobek může být v zemích EU uváděn do oběhu bez omezení. [26]

<sup>17</sup> QS9000 je standard systému kvality, který se zaměřuje na pomoc dodavatelů pro automobilový průmysl. Zavádí mimo požadavky uvedené v normě ISO 9001 i další z oblasti zavádění a schvalování výrobků zákazníkem. [33]

Kroky, jak se obecně analýza FMEA nebo FMECA<sup>18</sup> provádí, shrnul autor knihy Bezpečnost a spolehlivost technických systémů doc. Ing. Antonín Mykiska, CSc. [9] do následujících bodů:

- Zjistí se, jak má součást systému vykonávat svou funkci.
- Zjistí se potenciální způsoby poruch, jejich příčiny, následky a metody, jak tyto poruchy můžeme detekovat.
- Zjistí se riziko příslušející jednotlivým způsobům poruch a jejich důsledkům.
- Stanoví se doporučená opatření k odstranění nebo snížení rizika a provedou se.

Norma ČSN EN 60812 dále doporučuje vytvářet si v počátečních krocích i tzv. strukturu systému v rámci vymezené hranice systému, pro kterou se FMEA provádí. Do ní se v podobě diagramu (blokového schématu) uvedou veškeré subsystémy s logistickými spojeními mezi prvky a díly, které na sebe navazují. Příklad takového diagramu je uveden v kapitole 4.2. Tento úkon v další fázi, tedy ve fázi zjišťování potenciálních způsobů poruch, příčin a důsledků, značně usnadní postup a zpřehlední celkovou formu analýzy.

Zjištěné prvky a díly subsystémů se se způsoby poruch, jejich příčinami, důsledky, metodami detekce a případně i klasifikací RPN znázorní do přehledné tabulky, jejichž příklad je uveden také v kapitole 4.2.

FMECA je rozšířením analýzy FMEA o klasifikaci závažnosti způsobu poruch, aby bylo možné stanovit prioritu protiopatření. Klasifikace se provádí určením čísla priority rizika RPN dle (3), kde:

- *S* je bezrozměrné číslo, které klasifikuje závažnost, tedy odhad, jak silně budou důsledky poruchy ovlivňovat systém nebo uživatele.
- *O* je bezrozměrné číslo, které vyznačuje pravděpodobnost výskytu způsobu poruchy v daném časovém období.
- *D* je bezrozměrné číslo, které vyjadřuje míru detekce, tedy odhad zdali se porucha dokáže zjistit a eliminovat před tím, než bude mít na systém nebo uživatele vliv. [7]

$$RPN = S \times O \times D \quad (3)$$

Všechna tři bezrozměrná čísla *S*, *O* a *D* se získávají z tab. 4, 5 a 6. Výběr kritéria klasifikace se ale následně odvíjí od znalostí posuzovaného systému, vědomostí a zkušeností osoby či týmu lidí provádějící analýzu. Výsledek čísla RPN z (3) určí prvky s vysokým rizikem výskytu poruchové události, kterým by se měla věnovat pozornost.

---

<sup>18</sup> Failure mode, effects and criticality analysis v překladu „Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch“. Jedná se o logické rozšíření metody FMEA o odhad kritičnosti důsledků poruch a pravděpodobnosti jejich výskytu.



Tab 4) Klasifikační hodnoty pro kritérium významu poruchy (vady) S [10]

kritérium klasifikace významu poruchy (vady) S	klasifikace S
<u>Zanedbatelná</u> : Podstata poruchy (vady) je taková, že neovlivní schopnosti systému - výrobku, tj. uživatel pravděpodobně nezaznamená její výskyt.	1
<u>Nízká</u> : Porucha (vada) vyvolá u uživatele pouze potíže, nepozorují se poškozené funkce objektu - výrobku.	2
<u>Střední</u> : Porucha (vada) vyvolá obtíže u uživatele snížením pohodlí při užívání - porucha (vada) obtěžuje při ovládání, manipulaci. Uživatel zaznamená určité zhoršení vlastnosti výrobku.	3
<u>Vysoká</u> : Porucha (vada) vyvolá značné obtíže u uživatele, resp. způsobí vážné poškození, špatné vlastnosti výrobku; neovlivňuje však bezpečnost výrobku.	4
<u>Velmi vysoká</u> : Porucha (vada) ovlivňuje bezpečnost výrobků, jeho nezpůsobilost k provozu z hlediska zákonných předpisů.	5
	6
	7
	8
	9
	10

Tab 5) Klasifikační hodnoty pro kritérium výskytu způsobu poruchy (vady) O [10]

kritérium klasifikace výskytu způsobu poruchy (vady) O	odhad četnosti	klasifikace O
Není pravděpodobné, že porucha (vada) nastane.	0	1
	1/5000	2
<u>Velmi malá</u> : Jedná se o případ (např. proces) s ojedinělým výskytem poruchy (vady).	1/2000	3
	1/1000	4
	1/500	5
<u>Střední</u> : Odpovídá případům (např. procesům), kde obvykle dochází k náhodným poruchám (vadám), ale v menší míře.	1/200	6
<u>Vysoká</u> : Odpovídá případům, např. výrobním procesům s častými poruchami (vadami).	1/100	7
	1/50	8
<u>Velmi vysoká</u> : z hlediska uživatele je téměř jistý výskyt poruchy (vady).	1/20	9
	1/10	10

Tab 6) Klasifikační hodnoty pro kritérium odhalitelnosti poruchy (vady) D [10]

kritérium klasifikace odhalitelnosti poruchy (vady) D	"průchod" poruchy k uživateli [%]	klasifikace D
<u>Velmi vysoká</u> : Pravděpodobnost, že porucha (vada) by byla detekována kontrolou nebo při montáži.	0 až 5	1
<u>Vysoká</u> : Pravděpodobnost, že porucha (vada) se dostane k uživateli bez detekce - podle pravděpodobnosti průchodu poruchy k uživateli	6 až 15 16 až 25	2 3
<u>Střední</u> : Pravděpodobnost, že porucha (vada) se dostane k uživateli bez detekce - podle pravděpodobnosti průchodu poruchy (vady) k uživateli	26 až 35 36 až 45 46 až 55	4 5 6
<u>Nízká</u> : Pravděpodobnost, že porucha (vada) se dostane k uživateli bez detekce - podle pravděpodobnosti průchodu poruchy (vady) k uživateli	56 až 65 66 až 75	7 8
<u>Velmi nízká</u> : Pravděpodobnost, že porucha (vada) se dostane k uživateli bez detekce - podle pravděpodobnosti průchodu poruchy (vady) k uživateli	76 až 85 86 až 100	9 10

### 2.2.1 Uplatnění konceptu exponenciálního přístupu pro zvýšení hodnotící schopnosti FMEA

V závěru kapitoly o metodě FMEA se lze zmínit o článku autorů Kuei-Hu Chang<sup>19</sup>, Yung-Chia Chang a Pei-Ting Lai<sup>20</sup>. Navrhují a ukazují i možný další budoucí vývoj analýzy FMEA. Zavádí novou formu rovnice ERP<sub>N</sub>, která nahrazuje stávající rovnici (3) a číslo priority rizika RPN, jenž je definovaná dle (4). [8]

$$ERP_N(X) = X^{W_s \times S} + X^{W_o \times O} + X^{W_d \times D}, X \in Z \text{ a } X \geq 2 \quad (4)$$

V (4) proměnné  $S$ ,  $O$  a  $D$  jsou stejná jako při výpočtu RPN (3).  $X$  je definováno jako jakékoliv kladné celé číslo, které není menší než 2 a slouží jako parametr určující počet jedinečných hodnot výsledku ERP<sub>N</sub>. Pro porovnání za použití metody RPN můžeme dosáhnout pouze 120 jedinečných hodnot, za použití metody ERP<sub>N</sub> kdy  $W_s, W_o, W_d = 1$  a  $X = 2$ , 184 hodnot a za použití  $X = 3$  až 220 jedinečných hodnot. Autoři dle studie doporučují používat hodnotu  $X = 3$  a tak se metoda ERP<sub>N</sub> nově popisuje dle (5). [8]

$$ERP_N = 3^{W_s \times S} + 3^{W_o \times O} + 3^{W_d \times D} \quad (5)$$

Čísla  $W_s, W_o$  a  $W_d$  jsou váhy přiřazené k číslům  $S, O$  a  $D$  v daném pořadí a dovolují výsledek čísla priority rizika ovlivnit dle námi zvolené významnosti kritéria významu poruchy, výskytu způsobu poruchy nebo odhalitelnosti poruchy.

Pro příklad použijme (5) a zvolme, že  $W_s, W_o, W_d = 1$ . Dle tab. 7 můžeme vidět výsledek tohoto příkladu. Co se týče výsledku  $RPN = 24$  pro oba případy, vychází, že oba stavy jsou rizikově stejné. Ale dle výsledku  $ERP_N = 6591$  pro první případ, je porucha přetržení rizikovější, než nefunkční tlačítko. To se odvíjí od zvoleného čísla významu poruchy  $S$ . Proto se může předpokládat, že početní operace při zjišťování čísla priority rizika metodou ERP<sub>N</sub> je efektivnější, než způsobem RPN. [8]

Tab 7) Příklad vyhodnocení priority rizika metodou RPN a ERP<sub>N</sub> [8]

porucha	S	O	D	RPN	ERP <sub>N</sub>
Přetržení	8	1	3	24	6591
Nefunkční tlačítko	2	4	3	24	117

<sup>19</sup> Kuei-Hu Chang z Department of Management Sciences, R.O.C. Military Academy, Kaohsiung 830, Taiwan

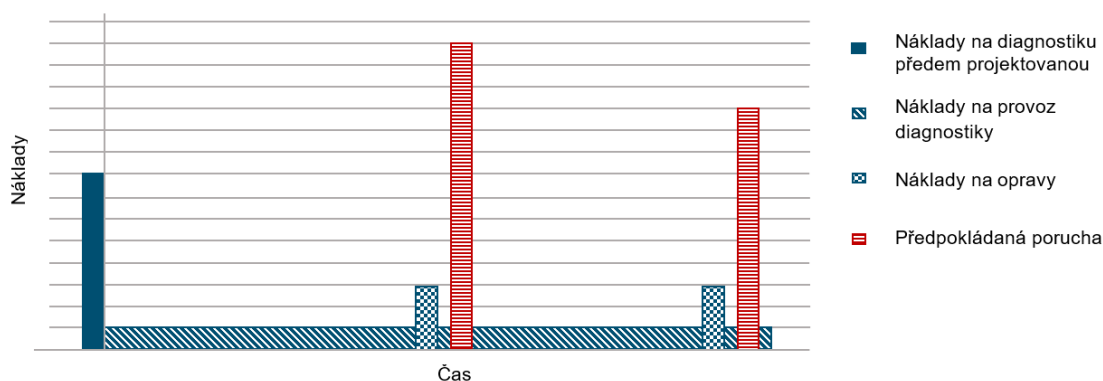
<sup>20</sup> Yung-Chia Chang a Pei-Ting Lai z Department of Industrial Engineering and Management, National Chiao Tung University, Hsinchu 300, Taiwan

## 2.3 Proaktivní systém údržby

K obecným požadavkům na údržbu patří mimo jiné především procesní a systémový přístup. Funkčnost a způsobilost strojního zařízení při vynaložení optimálních nákladů je účinnější při řízení údržby jako procesu a účinnost a efektivnost údržby je zvyšování i řízením vzájemně souvisejících procesů.

K dosažení těchto klíčových požadavků je nutné zvolit správnou a vyhovující metodu údržby, která má zásadní vliv na funkčnost a spolehlivost technického zařízení a významně ovlivňuje i jejich bezpečnost.

Za proaktivní systém údržby je považována současná vyšší úroveň údržby prediktivní, při níž se vychází ze skutečného stavu provozovaného objektu. Proaktivní varianta údržby vychází z prediktivní verze, kterou dále zdokonaluje. Jejím základem je opět využití diagnostiky, zpravidla ovšem mnohem komplexnější. [11]



Obr. 7) Schéma systému proaktivní údržby [11]

Proaktivní systém údržby v sobě zahrnuje jak údržbu dle technického stavu (kapitola 2.3.2), tedy prediktivní, tak i údržbu preventivní (kapitola 2.3.1). Dále lze proaktivní systém údržby rozdělit na dva stupně proaktivnosti.

První stupeň proaktivnosti oproti údržbě prediktivní využívá ve svém fungování na víc monitorování technického stavu (kapitola 3.1) stroje v reálném čase. Na poruchu nebo i na odchylku některé ze sledovaných veličin z normálního stavu lze tak reagovat hned a bez časového zpoždění. Riziko nebezpečí výskytu poruchy či porušení jiných dalších částí stroje se tak snižuje z důvodu vyšší šance odhalitelnosti změny stavu stroje, která by jinak byla svým charakterem poruchou skrytou.

Druhý stupeň proaktivnosti je ve své podstatě stupeň první, ale obohacen o některé další procesní a systémové koncepty v řízení údržby. Jako příklad lze zmínit komplexní produktivní údržbu TPM<sup>21</sup> (kapitola 2.3.3) nebo údržbu zaměřenou na bezporuchovost RCM<sup>22</sup>.

<sup>21</sup> Total Productive Maintenance (TPM) v překladu „Komplexní produktivní údržba“. Je využíván i překlad „Totálně produktivní údržba“.

<sup>22</sup> Reliability Centered Maintenance (RCM), v oficiálním překladu podle normy „Údržba zaměřená na bezporuchovost“, je metodika vypracování programů údržeb zpravidla pro složité stroje a zařízení s cílem zajistit jejich co největší bezporuchovost. [27]

### 2.3.1 Konvekční strategie údržby

Konvekční strategie údržby technických zařízení a systémů lze rozdělit do dvou skupin a to na korekční, tedy opravnou a preventivní. Korekční metoda údržby zasahuje až v případě represe a je založena na principu nutnosti zásahu až po selhání zařízení. Preventivní údržba je založena naopak na včasném zásahu v oblasti známých běžně se vyskytujících selhání. Preventivní údržba se nejčastěji vykonává podle předem zadaného plánu údržby<sup>23</sup>, popř. na základě objektivních ukazatelů definovaných a vytvořených analýzou spolehlivosti a na základě empirických dat z minulosti. Takovéto údržbě říkáme, že je předem determinovaná. [12]

Preventivní údržba významně zlepšuje provozní spolehlivost technických zařízení, ale také významně prodražuje provozní náklady na údržbu a stroj jako takový. Zařízení a komponenty se vyměňují dlouhou dobu před koncem životnosti. Studie [13] v minulosti navíc ukázaly, že příčiny vážných selhání zařízení často nesouvisí s dobou provozu zařízení. Dokazuje to, že preventivní předem determinovaná údržba založená na časovém plánu nepřináší vždy očekávaný efekt a může být také velmi nákladná. [12]

### 2.3.2 Údržba podle technického stavu

Dle zmíněné části o konvekčních metodách údržby je patrné, že k efektivní a správné údržbě je potřeba přistupovat mírně odlišným způsobem. Údržba podle technického stavu se jeví jako nejvhodnější alternativa konvekčních metod a je brána jako další podskupina preventivní údržby. Využívá možnosti diagnostiky a prognostiky k určení funkčního stavu zařízení. [12]

Na základě vyhodnocení technického stavu zařízení je možné předvídat stav degradace daného zařízení a vyvozovat tak případná další selhání zařízení. V tomto případě mluvíme o tzv. prediktivní údržbě, která je podmnožinou údržby podle technického stavu zařízení. [12]

### 2.3.3 Komplexní produktivní údržba TPM

Komplexní produktivní údržbu TPM lze definovat jako „moderní způsob organizace a řízení údržby výrobních zařízení v rámci podniku“ [14]

Cílem tohoto konceptu je maximální efektivita zařízení po celou dobu jejich života a týká se všech zaměstnanců všech oddělení a všech úrovní. Dále se orientuje na zapojení všech pracovníků v dílně do aktivit, které směřují k minimalizaci prostojů, poruch a neshodných výrobků. [14]

Vychází se z předpokladu, že pracovník, který obsluhuje stroj, má šanci jako první zachytit abnormality na stroji či zařízení při výkonu své práce a identifikovat případné zdroje budoucích poruch zařízení. Maximum smyslových diagnostických a malých údržbářských činností se tedy v TPM přenáší z klasických oddělení údržby přímo na výrobní pracovníky a výrobní úseky. [14]

---

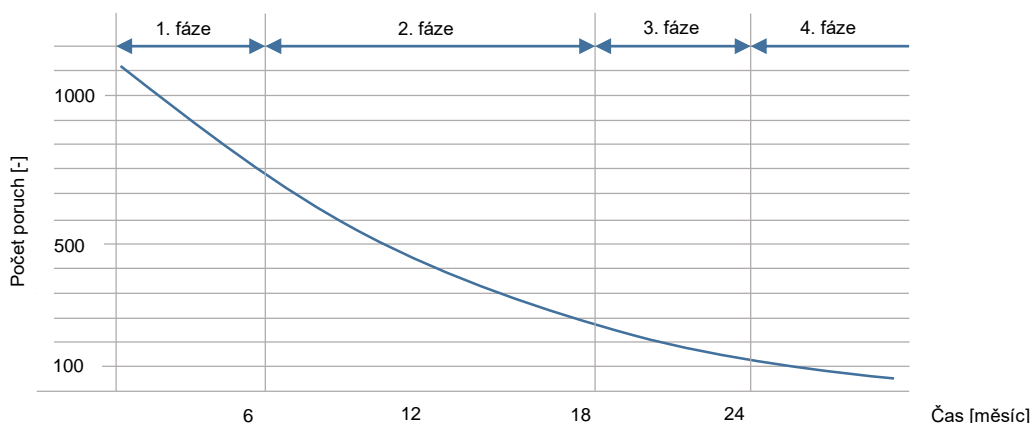
<sup>23</sup> Plán údržby je definován jako strukturovaný soubor úkolů, do něhož se zahrnují činnosti, postupy, zdroje a časové plánování, nutné k provádění údržby. [34]

„Filosofie TPM spočívá nejenom v předcházení poruchám, ale také v redukci chyb, krátkodobých prostojů, ve zkracování doby změn sortimentu apod. TPM je progresivní přístup organizace údržby, který objektivně vyžaduje stále složitější výrobní zařízení, nářadí a přístroje.“ [15]

TPM je postaveno na několika základních pilířích. Jejich počet se může lišit např. dle země použití. Mezi základní se ale řadí těchto pět pilířů:

- Hodnocení celkové efektivnosti strojů a zařízení (pomocí ukazatelů CEZ/OEE<sup>24</sup>)
- Autonomní údržba<sup>25</sup>
- Plánovaná údržba
- Systém pro návrh preventivní údržby a včasný management
- Vzdělávání a trénink [15]

Jako přínosy implementace TPM lze zmínit např. snižování nákladů na údržbu a opravy, zkracování výrobních časů, zvyšování kapacity výrobních zařízení, zlepšování procesů, zvyšování motivace zaměstnanců nebo snižování poruch a prostojů. [16]



Obr. 8) Čtyřfázový program implementace kroků TPM [16]

1. Fáze: Stabilizace časového intervalu mezi výskyty poruch strojů a zařízení (čistota, autonomní údržba, trénink pracovníků údržby a výroby).
2. Fáze: Prodloužení životnosti zařízení (odstraňování zdrojů znečištění, normy čištění a mazání, preventivní údržba)
3. Fáze: Periodická obnova zhoršeného stavu zařízení (úplná autonomní údržba a plánovaná údržba)
4. Fáze: Predikce životnosti zařízení (diagnostická kontrola stavu)

<sup>24</sup> Overall Equipment Effectiveness (OEE) v překladu „Celková efektivnost zařízení“ (CEZ) je funkcí ztrát, které jsou způsobeny poruchami, ztrátami výkonu vlivem redukované rychlosti a seřizovacími časy a také nízkou kvalitou vyráběných výrobků. [28]

<sup>25</sup> Autonomní údržba je chápána jako údržba vykonávaná obsluhou stroje.

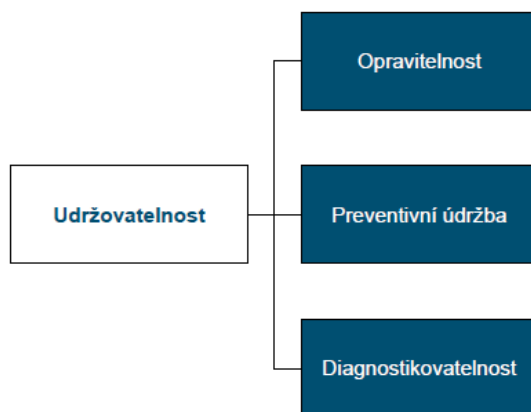
### 3 DIAGNOSTIKA OBRÁBĚCÍCH ZAŘÍZENÍ

Dle definice: „Diagnostika je ověření symptomů a syndromů pro určení povahy vad nebo poruch (druh, situace, rozsah)“ [2]

Technickou diagnostiku lze popsat jako určení příčiny a místa poruchy, detekci postupně narůstajících poškození a jako prognózování vývoje technického stavu. S rostoucí složitostí a cenou strojů se význam těchto činností zvyšuje a technická diagnostika jako taková se stává nepostradatelnou součástí systému údržby strojů a strojních součástí. [17]

Správně vykonaná diagnostika obráběcího stroje či obecně mechanického stroje nám řekne mnoho důležitých informací o současném stavu stroje. Může odhalit řadu skrytých vad a poruch, které by bez detekce a následné opravy mohli v pozdějších fázích provozu stroje vyvolat řadu nežádoucích důsledků na provozní chod stroje a řadu dalších navazujících důsledků technického, logistického, ekonomického a morálního charakteru.

I diagnostikovatelnost jako taková je součástí spolehlivosti a její definice. Vychází z udržovatelnosti stejně jako s ní související opravitelnost a preventivní údržba (obr. 9).



Obr. 9) Diagnostikovatelnost jako součást definice spolehlivosti [3]

Diagnostikovatelnost poruchového stavu je operace prováděná za účelem sledování a zjištění poruchového stavu, lokalizace porouchané součásti a identifikace vady nebo poruchy. Tedy základními úkoly technické diagnostiky je detekce vady nebo poruchy a lokalizace této vady nebo poruchy.

Technická diagnostika je v praxi hlavním nástrojem kontrolně inspekční a revizní činnosti (zjišťování technického stavu a opotřebení), rozhoduje o nutnosti a rozsahu prováděných oprav (odstraňování následků opotřebení), kde hodnotí dodržování zásad správného provozu.

### 3.1 Diagnostické metody obráběcích zařízení

Diagnostické metody obráběcích zařízení lze rozdělit na dvě skupiny. První skupina těchto metod je vhodnější pro koncept údržby, zjištění technického stavu zařízení, popřípadě i monitorování<sup>26</sup> tohoto technického stavu. Mezi tyto diagnostické metody lze zařadit např. vibrodiagnostiku, diagnostiku určení tepelných vlivů (termodiagnostika<sup>27</sup>) nebo tribotechnickou<sup>28</sup> diagnostiku. Novější strojní zařízení již obsahují řadu čidel a zařízení, které umožňují technický stav stroje dle těchto diagnostických metod sledovat (monitoring).

Druhá skupina diagnostických metod obráběcích zařízení poskytuje především informaci o stavu geometrické přesnosti stroje. Metody se často řídí normami řady ISO 230. Kromě nich lze uplatnit např. měření upínací síly<sup>29</sup> a laserovou interferometrii.

Veškeré tyto diagnostické metody zkoušení se mohou vzájemně kombinovat a výrazně napomáhají k dlouhodobému a spolehlivému provozu stroje včetně schopnosti stále vyrábět díly s požadovanou přesností a v požadované jakosti. Výběr diagnostických metod a jejich popis je vypsán dále.

Normy řady ISO 230:

- ČSN ISO 230-1 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek
- ČSN ISO 230-2 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslíkové řízených osách
- ČSN ISO 230-3 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 3: Určení tepelných vlivů
- ČSN ISO 230-4 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslíkové řízených obráběcích strojů
- ČSN ISO 230-5 Zkušební předpisy pro obráběcí stroje - Část 5: Určení emise hluku
- ČSN ISO 230-6 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 6: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení)
- ČSN ISO 230-7 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 7: Geometrická přesnost os rotace
- ČSN ISO 230-10 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 10: Určení měřicích vlastností snímacích systémů číslíkové řízených obráběcích strojů

<sup>26</sup> O monitorování se jedná, když je systém funkční (provozní) diagnostiky (jiné ozn. ON-LINE) v činnosti nepřetržitě – stroj je v normální činnosti.

<sup>27</sup> Termodiagnostika využívá poznatků termografie (měření teploty pomocí termokamery), což je pasivní, bezdotyková měřicí metoda. Díky vypočítané teplotě se následně vytvoří obraz, vypovídající o povrchovém rozložení teplot (tzv. termogram). [36]

<sup>28</sup> Tribotechnika se zabývá mazivy, mazacím zařízením a pracovními postupy mazání. Jde o spojení teoretického a praktického řešení v oblasti mazání, tření a opotřebení. Ve většině případů se pravidelně sleduje, je-li mazací systém strojů v pořádku, má spolehlivé těsnění a kontroluje se hladina oleje. [35]

<sup>29</sup> Snížená síla, kterou je součást ve vřetenu upnuta může mít za následek nedosažení požadované kvality obrábění či i poškození samotného vřetene stroje.

### 3.1.1 Měření kruhové interpolace

Metodou se zabývá mezinárodní standard ISO 230-4 o zkoušce kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojích.

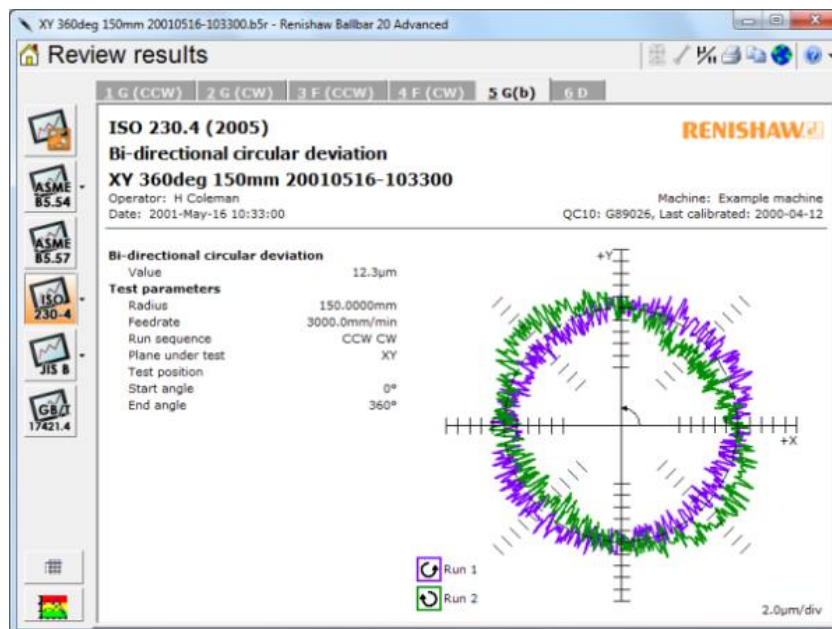
Měření kruhové interpolace probíhá za pohybu po dráze ve tvaru kružnice se známým poloměrem. Rozdíl mezi naprogramovanou a reálnou drahou nám dá následně informaci o přesnosti CNC stroje. Dále zjištěný rozdíl je využit např. k výpočtu kruhovitosti a odchylky kruhovitosti. [4]

Z vyhodnocení změřených dat lze určit dvacet jedna různých vad s informací, jakou měrou se tyto jednotlivé vady podílejí na celkové změřené odchylce. [4]

Po vyhodnocení testu a k následné prezentaci výsledků jsou nejdůležitější parametry:

- Dvousměrná odchylka kruhovitosti  $G(b)$ .
- Průměrná двousměrná radiální odchylka  $D$ , opravená na teplotu 20°C.
- Odchylka kruhovitosti  $G$  pro dráhu ve směru pohybu a/nebo proti směru pohybu (hodinových ručiček).
- Radiální odchylka  $F_{\max}$  a  $F_{\min}$  pro směr pohybu ve směru a proti směru pohybu (hodinových ručiček), opravené na teplotu 20°C. [18]

V obr. 10 se nachází ukázka analýzy změřených dat, přesněji двousměrné odchylky kruhovitosti  $G(b)$  dle ISO 230-4. Znázorňuje minimální radiální vzdálenost dvou soustředných kružnic ohraničující dvě skutečné dráhy, kde jedna dráha je tvořena pohybem ve směru hodinových ručiček a druhá dráha pohybem proti směru hodinových ručiček.



Obr. 10) Ukázka změřené двousměrné odchylky kruhovitosti  $G(b)$  programem firmy Renishaw<sup>30</sup> [19]

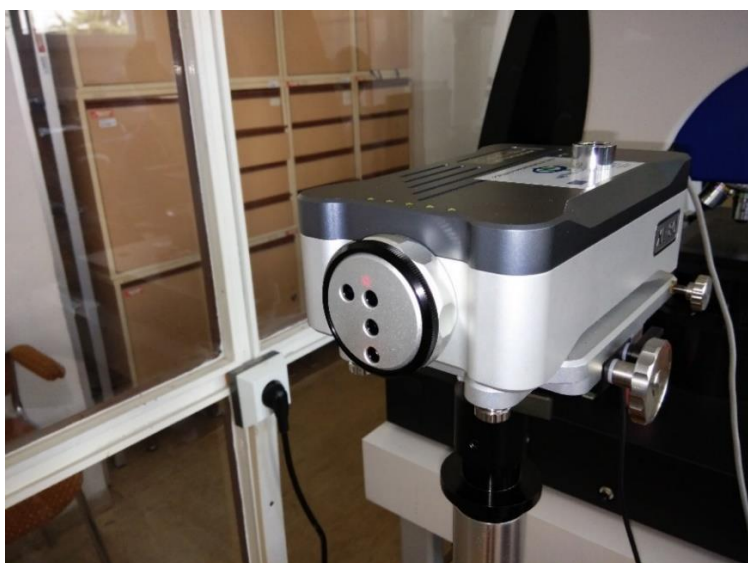
<sup>30</sup> Dvousměrná odchylka kruhovitosti  $G(b)$  změřena bezdrátovým systémem Renishaw ballbar QC20-W pro diagnostiku přesnosti obráběcích strojů.



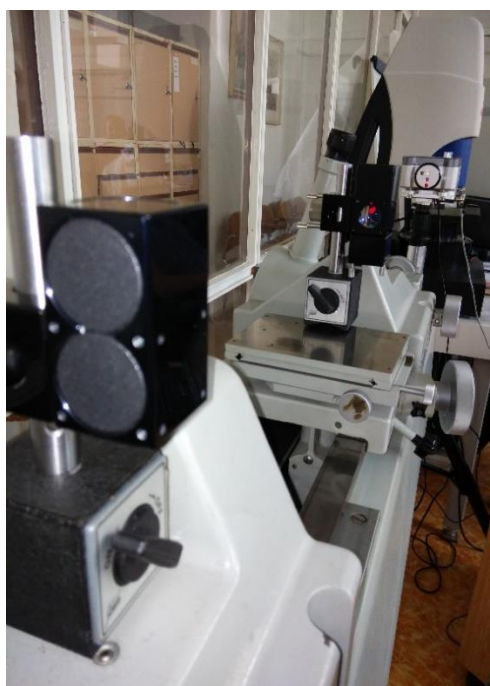
### 3.1.2 Laserová interferometrie

Laserová interferometrie je využívána k měření přesnosti polohování stroje. K měření se používá tzv. interferometr, kterým lze měřit odchylky polohy, sousosti, přímosti, rovnoběžnosti a kolmosti lineárních vedení. Referenčním etalonem přímosti je zde laserový paprsek. [4]

Přístroj, interferometr, určuje nestandardní odchylky polohování na základě detekce dopadajícího laserového paprsku na senzoru laserového přijímače. Příklad takového interferometru je uveden na obr. 11. Uvedený model XL-80 umožňuje např. lineární měření s přesností až  $\pm 0,5 \text{ ppm}$ . [4]



Obr. 11) Přístroj interferometr XL-80 značky Renishaw



Obr. 12) Ukázka sestavení interferometru XL-80 a příslušenství značky Renishaw při kontrole odchylky měření délkoměru

### 3.1.3 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostika neboli měření vibrací rotujících zařízení. Vibrace těchto rotujících zařízení mohou být způsobena řadou vlivů jako např. technickým stavem ložisek, vřetena, nevyvážeností a jiných dalších mechanických či elektrických poruch. Proto je vibrodiagnostika chápána a využívána jako jedna ze základních metod diagnostiky. [20]

Měření vibrací jsou nejčastěji prováděna v místech uložení ložisek. V ostatních případech je měření prováděno co nejbližší k předpokládanému zdroji vibračního signálu. Tento signál by měl co nejvěrněji odpovídat průběhu mechanického kmitání. [21]

Hodnocení technického stavu daného stroje je možné následujícími metodami:

- 1) Měření a analýza určujících veličin mechanického kmitání
- 2) Měření a analýza obálky zrychlení
- 3) Měření a analýza obálky akustické emise (AEE) [20]

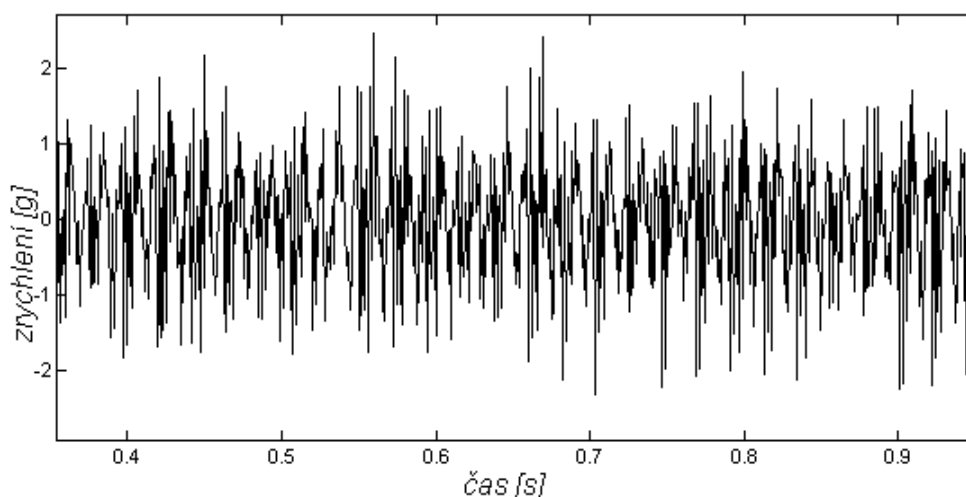
#### 1. Měření a analýza určujících veličin mechanického kmitání

„Měření a analýza určujících veličin mechanického kmitání jsou základní skupinou metod, které musí být zařazeny do všech systémů prediktivní údržby využívající vibrační diagnostiku.“ [20]

##### Měření a analýza časového průběhu určujících veličin mechanického kmitání

Časový průběh určujících veličin mechanického kmitání zobrazují relativně krátký časový úsek měřených vibrací. Takový časový průběh je nutné považovat za vhodnou informaci při multiparametrickém monitorování stavu<sup>31</sup> strojů a zařízení. [20]

Na obr. 13 je vidět časový záznam zrychlení získaný měřením na konstrukci s poškozeným ložiskem. Při jeho analýze se zjišťuje jak celková změna amplitudy, tak i časová vzdálenost výrazných špiček. [20]



Obr. 13) Časový záznam zrychlení u poškozeného ložiska [20]

<sup>31</sup> Multiparametrické monitorování stavu ve vibrační diagnostice představuje postup, kdy se k vyhodnocení stavu zkoumaného objektu použije více metod vibrační diagnostiky s cílem co nejpřesněji zhodnotit jeho stav. [20]

### Analýza „celkových hodnot“ vibrací (OVERALL)

„Celkovou hodnotu vibrací  $o$  rozumíme hodnotu měřené veličiny úměrnou celkové vibrační energii vztažené k uvažovanému časovému záznamu.“ [20]

Zjištěním hodnoty celkových vibrací  $o$  a jejím porovnáním s normální úrovní lze získat jedna z možných informací o stavu stroje nebo jeho části. Měření obou hodnot je nutné provést ve stejném frekvenčním rozsahu i ve stejném vyjádření (např. špičková hodnota nebo efektivní hodnota). Pokud je následně hodnota celkových vibrací vyšší než normální úroveň, může se předpokládat, že existuje problém, jenž tyto vyšší hodnoty způsobil. [20]

### Trendování celkových hodnot vibrací

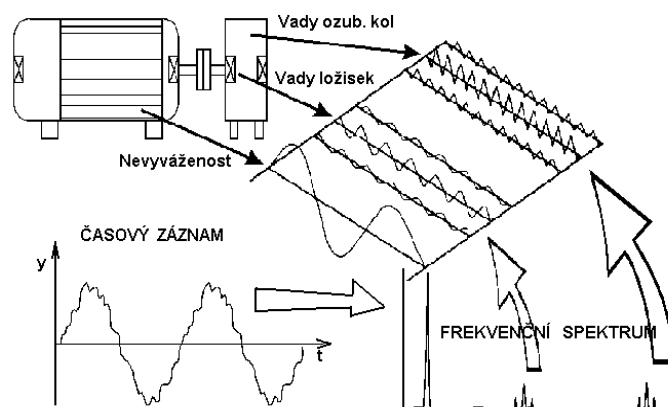
Porovnání posledních naměřených hodnot s předchozími hodnotami je zřejmě nejvhodnější a nejspolehlivější metodou pro zhodnocení celkových vibrací. Porovnání umožňuje sledovat, jak se hodnoty celkových vibrací mění v průběhu provozu stroje. [20]

Jestliže jsou celkové hodnoty vynášeny do grafu, kde osa  $x$  představující např. datum měření a osa  $y$  znázorňující celkovou hodnotu vibrací, pak spojením hodnot čarou se vytvoří tzv. trendový graf. [20]

Trendový graf je posléze velmi dobrým a názorným ukazatelem celkových vibrací v čase. Sledování těchto celkových hodnot vibrací je považováno za vhodný postup, pomocí kterého lze spolehlivě odhalit postupné změny v technickém stavu rotačních částí strojního zařízení. [20]

### Spektrální analýza určujících veličin mechanického kmitání pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT)<sup>32</sup>

Princip analýzy frekvenčního spektra je znázorněn na obr. 14. Obrázek znázorňuje, jak různé vady stroje generují charakteristické vibrační signály. [20]



Obr. 14) Frekvenční spektrum<sup>33</sup> – princip analýzy [20]

<sup>32</sup> Fourierova transformace je základním nástrojem pro (lineární) zpracování signálů a v teorii řízení. Dovoluje vzájemně jednoznačný převod signálu z/do časové reprezentace  $f(t)$  do/z frekvenční reprezentace  $F(\xi)$  a umožňuje analyzovat frekvenční obsah (spektrum) signálu.

<sup>33</sup> Frekvenční spektrum vibrací je takto schopno poskytnout informace, které umožňují určit příčinu zvýšených vibrací. [20]

### Celková hodnota frekvenčního spektra (OVERALL FFT)

„Za celkovou hodnotu frekvenčního spektra  $O_f$  označujeme hodnotu měřené veličiny úměrné celkové energii vztažené k uvažovanému frekvenčnímu rozsahu.“ Z daného frekvenčního spektra (příp. frekvenčního pásma) ho vypočítáme dle vztahu (6). [20]

$$Q_f = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i)^2}}{\sqrt{\check{S}_p}} \quad (6)$$

$y_i$  .....amplituda i-té čáry ve frekvenčním spektru

$n$  .....počet čar ve frekvenčním spektru

$\check{S}_p$  .....šířka pásma šumu pro zvolené okno  
(korekce vypočítané efektivní hodnoty s ohledem na typ okénkové funkce)

$\check{S}_p = 1,4995212$  .....u Hanningova okna

$\check{S}_p = 3,782893$  .....u Flat Top okna

$\check{S}_p = 1,0$  .....u obdélníkového okna

Když označíme:

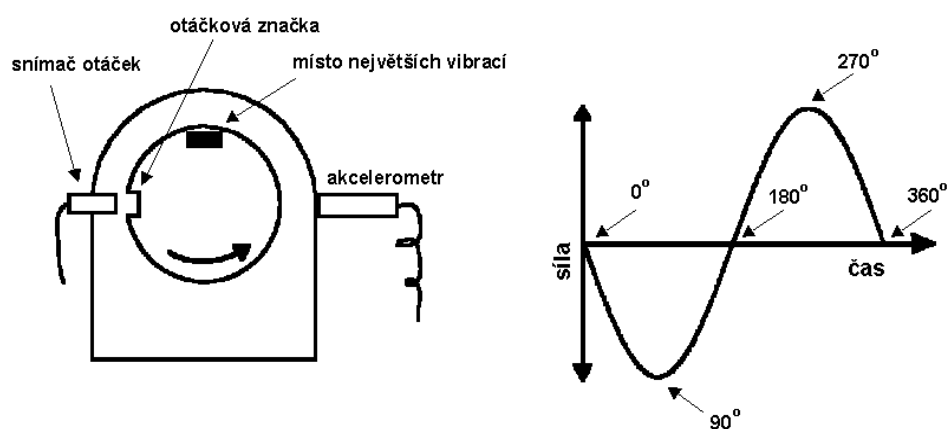
$Q_{f(H)}$  ..... celkové vibrace zjištěné při použití Hanningova okna

$Q_{f(F)}$  .....celkové vibrace zjištěné při použití Flat Top okna

Změny celkových hodnot vypočteny takovýmto způsobem je možné považovat za další vhodnou informaci o změnách technického stavu stroje. [20]

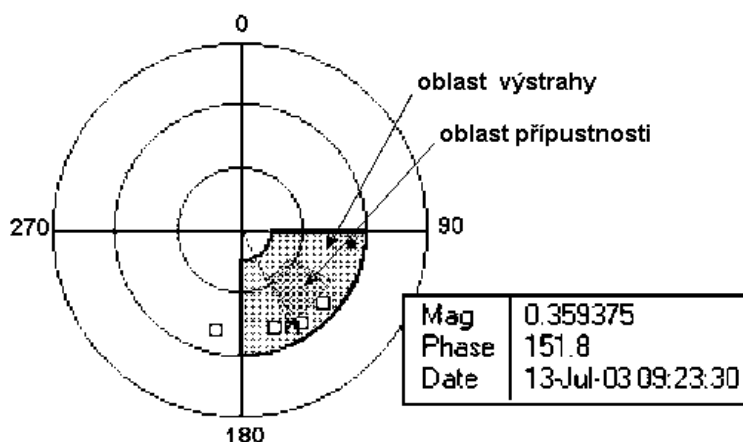
### Měření a analýza fáze

Měřením fáze ve vibrodiagnostice je postup, kterým určujeme úhlový posun mezi signálem od referenční značky umístěné na rotující části a vibračním signálem hřídele. Fázovým úhlem je úhel, o který se pootočí hřídel z polohy, kdy bylo zahájeno měření příslušné určující veličiny mechanického kmitání do polohy, ve které naměří snímač maximální kladnou odchylku. Tento postup je znázorněn na obr. 15, kde je fáze zrovna  $270^\circ$ . [20]



Obr. 15) Měření fáze při vibrační diagnostice [20]

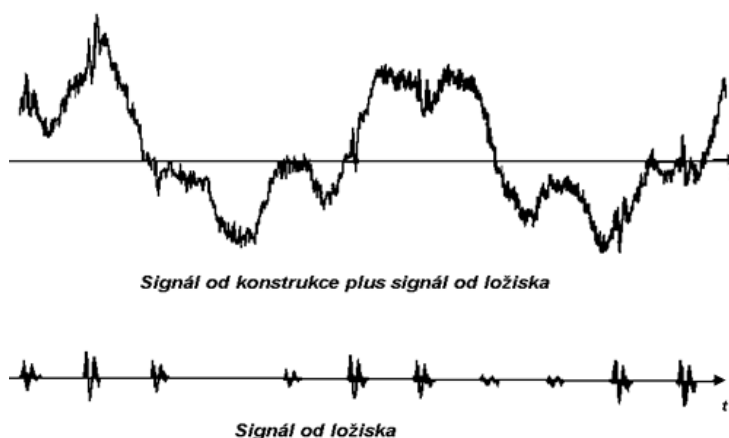
Měření fáze je možné využít pro tvorbu polárních vektorových grafů (obr. 16), které znázorňují fázi a velikost zvolené veličiny mechanického kmitání. V grafu je následně možné definovat oblast, která odpovídá dovolenému stavu, resp. oblasti přípustnosti a oblast výstrahy. Překročení této meze výstrahy je považováno za vstup do oblasti poplachu. [20]



Obr. 16) Polární vektorový graf [20]

## 2. Měření a analýza obálky zrychlení

Problém analýzy časového signálu je znázorněn v obr. 17. Vedle signálu od konstrukce stroje se v něm nachází i nízkoenergetický impulsní signál způsobený závadou v ložisku. [20]



Obr. 17) Časový záznam zrychlení obsahující složky od vadného ložiska [20]

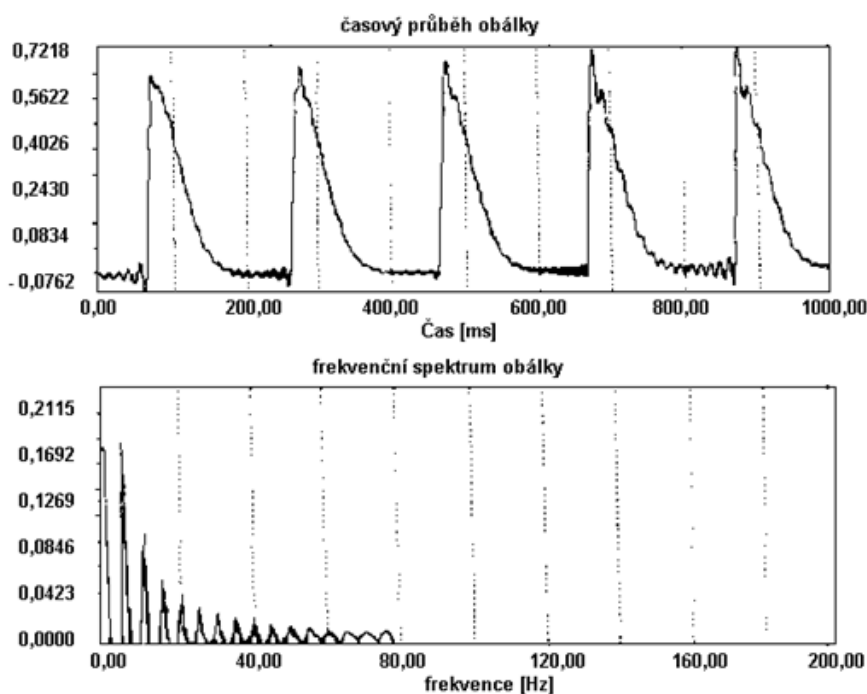
Obálka zrychlení je metoda, která se používá pro extrahování a zvýraznění určité charakteristiky dynamického signálu. Nejobvyklejší aplikací této metody je právě analýza ložiskových vad a ozubených převodů, kde je vadou vždy vytvářen nízkofrekvenční a obecně opakovací děj s velmi malou amplitudou. Tento děj následně vytváří poměrně značně široké frekvenční spektrum, a proto jsou amplitudy harmonických složek frekvence závad obvykle ponořeny v šumu. Jedinečnou vlastností amplitudově modulovaných signálů je to, že obálka (tvar průběhu malých harmonických amplitud ve velkém frekvenčním rozsahu) má stejný tvar jako frekvenční závady. [20]

### Princip metody obálování

Prvním krokem v metodě obálování se oddělí signály vad od nízkofrekvenčních vibrací stroje pomocí správně zvoleného pásmového filtrování. Účelem pásmového filtru je potlačit nízkofrekvenční signály s velkou amplitudou a zvýraznit pouze vysokofrekvenční harmonické složky opakovacích impulsních signálů způsobených vadami. [20]

Při druhém kroku obálové analýzy je vytvořen za pomoci matematických operací kvadrát filtrovaného časového signálu. Protože signál od závady je opakovací, může být simulován pomocí harmonické řady sinusových vln, které jsou celými násobky frekvencí vady. [20]

Na obr. 18 je následně znázorněn časový průběh a frekvenční spektrum obálky, které vzniklo takovýmto zpracováním periodického impulsního signálu z původního složitého vibračního signálu. [20]



Obr. 18) Časový průběh a frekvenční spektrum obálky [20]

Pro praxi je pravděpodobně nejvhodnějším ukazatelem stavu skutečná špička obálky. Větší hodnota obálky přirozeně znamená, že existuje větší budící síla, která je vyvolána větší vadou. Velikost hodnot se při dalším vývoji vady může i snižovat, nejpravděpodobněji právě v důsledku vyhlazování hran kráteru a s tím souvisejícím zlepšením toku maziva. [20]

### 3. Měření a analýza obálky akustické emise (AEE)

Metoda AEE využívá detekci akustické emise ve frekvenčním rozsahu od 100 do 500 kHz vznikající při provozu rotačních částí mechanismů strojů a zařízení. To umožňuje spolehlivě odhalovat např. poškození jednotlivých částí ložisek, zubů převodovek, řetězů, hnacích řemenů, pracovních válců, elektrických šumů, apod. [20]

Základ metody zpracování signálu AEE je velmi podobný vytváření obálky. Hlavním rozdílem oproti klasické obávkové metody je použitý pásmový filtr (100 – 500 kHz), jenž je dostatečně vzdálen od strukturních rezonancí a relativně velká vzdálenost mezi frekvenčním rozsahem obávkovaného nízkofrekvenčního signálu a frekvenčním pásmem, ze kterého jsou informace zjišťovány. [20]

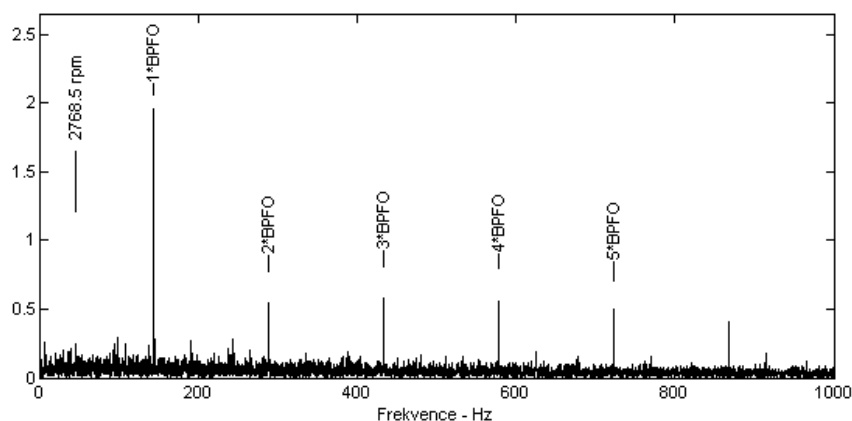
Obecně se může předpokládat, že vyšší hodnoty AEE jsou výsledkem rozsáhlejšího poškození. Avšak amplituda naměřených hodnot může poklesnout v důsledku vyhlazování okrajů trhlin. Současně se může změnou mazacího prostředku nebo jeho množstvím, zlepšit mazání a tím podstatně minimalizovat kontakt třecích kovových ploch, který je skutečným zdrojem signálu AEE. [20]

Měření AEE poskytují výborné informace v raných stádiích rozvoje závady, včetně případů zatížených ložisek se ztrátou mazání. Jak otáčky, tak i tuhost stroje nejsou důležité. Měření AEE nedávají významné hodnoty u aplikací, kde se jedná o jiné záležitosti než napětové nebo deformační vady (např. nesouosost, nevyváženost, uvolnění a záběr ozubení). [20]

#### Spektrální analýza AEE pomocí rychlé Fourierovy transformace

Analýza spektra AEE snadno rozlišuje různé zdroje signálu AEE jako jsou frekvence závad ložisek, závady ozubení, kavitace, elektrický šum atd. [20]

Na obr. 19 je znázorněno frekvenční spektrum signálu AEE, pomocí kterého byl odhalen zdroj zvýšeného signálu AEE, resp. poškozený vnější kroužek ložiska ZVL 6306. [20]



Obr. 19) Frekvenční spektrum signálu AEE ložiska s poškozeným vnějším kroužkem [20]

## 4 PRAKTICKÁ ČÁST

Hlavním úkolem praktické části bakalářské práce je navrhnutí dalšího postupu a doporučení v oblasti řešení problematiky údržby ve výrobním závodě SMC Industrial Automation CZ s.r.o. ve Vyškově. Postup k dosažení úkolu byl proveden konkrétně pro jeden daný typ strojního zařízení a je dále vhodný i na řadu dalších obráběcích strojů v provozu.

Na začátku praktické části je přiblížení společnosti SMC a je popsán současný stav údržby pro konkrétní závod SMC ve Vyškově.

Za předmět analýzy strojního zařízení byl vybrán ve firmě početně používaný typ automatického soustruhu CNC. Pro něj je vytvořena analýza způsobů a důsledků poruch FMEA, dále je provedeno diagnostické měření pro zjištění aktuálního stavu stroje a navrhnut další postup a doporučení v oblasti řešení zavádění systému údržby.

### 4.1 SMC Industrial Automation CZ s.r.o.



Obr. 20) Logo společnosti SMC [22]

Společnost SMC byla založena roku 1959 v Tokiu, v Japonsku, jako výrobce filtrů a filtračních vložek ze spékaného bronzu. Nyní je SMC považována za globálního lídra v oblasti průmyslové automatizace s pneumatickými a elektrickými systémy. Standardní portfolio zahrnuje 12 000 prvků s více než 700 000 variantami, od úpravy stlačeného vzduchu, přes ventily, pohony a elektronické prvky, až po prvky pro vakuum, což umožňuje vyhovět i nejnáročnějším požadavkům automatizace. [22]

Tab 8) Společnost SMC ve faktech [23]

Společnost SMC - Fakta a údaje
Založena v roce 1959
Ředitelství společnosti v japonském Tokiu
Přes 12 000 standardních prvků a více než 700 000 variant
Více než 16 000 pracovníků na celém světě
Pět výzkumných středisek v Japonsku, Číně, USA a Evropě
33 výrobních závodů ve 28 zemích
400 prodejních zastoupení v 82 zemích celého světa

Výrobní závod SMC Industrial Automation CZ s.r.o. ve Vyškově na Moravě byl vybudován v roce 2011 s cílem specializovat svoji produkci na výrobu pneumatických prvků pro pohon či ovládání automatizovaných zařízení, konkrétně lineárních pohonů a ventilových bloků. Je také držitelem certifikace dle ISO 9001 v řízení kvality.





Obr. 21) Výrobní závod SMC Industrial Automation CZ s.r.o. ve Vyškově na Moravě

#### 4.1.1 Současný stav údržby v SMC Vyškov

Ve firmě SMC ve Vyškově je v současné době zaveden a udržován převážně preventivní systém údržby. Údržba je prováděna v předem určených intervalech dle předepsaných kritérií a tedy i zaměřena na snížení rizika pravděpodobnosti poruchy nebo degradace fungování strojního zařízení. V současné době se zaměřuje ve svých provozech na rozvoj systémů údržby obráběcích strojů, které vychází z výsledků technické diagnostiky.

Plán údržby je postaven na základě předepsané a doporučené údržby dle manuálu každého strojního zařízení. Dále je doplněn prvky údržbářských a řídicích činností vycházejících z komplexní produktivní údržby TPM. Jsou to např. prvky autonomní údržby a vzdělávání a tréninků pracovníků výroby.

Autonomní údržba je zde prováděna obsluhou výrobních strojů. Obsluha zde rozlišuje normální a abnormální chod stroje, umí na základní uživatelské úrovni tyto abnormální výskyty korigovat v chodu stroje, zajišťuje normální podmínky chodu stroje, sleduje kvalitu komponentů stroje, včetně obrobených součástí, provádí čištění a především obsluha provádí pravidelné prohlídky stroje dle firmou vytvořeného inspekčního listu.

Inspekční list (obr. 22) každého stroje je obměňován za nový kalendářní měsíc. Obsahuje seznam úkonů prováděných denně, týdně a měsíčně. Náležitosti roční údržby se následně nachází na samostatném archu. Společně s inspekčním listem je používána tzv. identifikační karta vyrobena pro každé jednotlivé výrobní zařízení v závodě. Identifikační karta obsahuje kromě základních parametrů stroje např. typ a název náplní a kapalin používaných ve stroji a servisní kontakt.

V případě poruchy a nemožnosti odstranění této poruchy v rámci závodu je oprava zajištěna v rámci externího řešení, outsourcingem<sup>34</sup>.

<sup>34</sup> Outsourcing údržby je nahrazení vlastních údržbářských kapacit cizími (dodavatelskými) při výkonu činností, které se obvykle provádí s využitím vlastních zdrojů. Je jednou z možných a v mnohých podnicích populární strategií údržby. [37]

Tab 9) Náležitosti obsažené v inspekčním listu

<b>Kontrola 1x denně</b>
Uvedení do chodu po zapnutí hlavního zdroje
Zapsat množství chladicí emulze, koncentrace
Zkontrolovat tlak na vstupu
Nahromadění špon ve filtru chlazení
Zapsat množství lubrikačního oleje
Zapsat množství hydraulického oleje v zásobníku
Trysky jsou v pozici pro obrábění
Zanesení sacího filtru chladicí kapaliny
Abnormalita za automatickým chodu
<b>Kontrola 1x týdně</b>
Zapsat množství oleje hlavního vřetena
Vyndat a vyčistit (vedlejší vřeteno)
<b>Kontrola 1x měsíčně</b>
Vyčistit kluzné vedení a kleštinu (hlavní vřeteno)
Únik vzduchu či oleje z potrubí, zařízení
Zkontrolovat poškození tlakové měrky
<b>Kontrola každé 2 měsíce (každý lichý měsíc)</b>
Znečištění chladicího ventilátoru

Tab 10) Náležitosti obsažené v ročním plánu údržby

<b>Kontrola 2x ročně - únor/srpen</b>
Namazání kolenové páky vřeten (hlavní, vedlejší)
<b>Kontrola 2x ročně - březen/září</b>
Namazání kolenové páky
<b>Kontrola 1x ročně - dle data uvedeného na baterii</b>
Výměna baterií v jednotce
<b>Kontrola 1x ročně - dle plánu roční údržby</b>
Výměna chladicí emulze, vyčištění vany
Vytáhnout a vyčistit pás pro odvod třísek
Znečištění uvnitř rozvodové skříně
Zkontrolovat házivost vřetene (hlavní, vedlejší)

Rok	2015	Měsíc	Prosince	Značka
Označení stroje		Divize	Machining	
Typ stroje	CNC SOUSTRUH	Zpracováno dne	11.8.2014	LT18

### Inspekční list

No.	Kontrola 1x denně	Hodnota	Termín	Způsob/položky	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	Uvedení do chodu po zapnutí hlavního zdroje (alarm svítí/něsvítí)	Správně nastavení	Vizuálně (bez abnormalit)																																
2	Zapast množství chladicí emulze, koncentrace	Emulze mezi min/max Koncentrace min. 8% / optim. 10-20%	Kontrola měřky/refrakomet/doplnit																																
3	Zkontroluje tlak na vstupu	Mezi zelenými šipkami	Vizuálně																																
4	Nařinování špon ve filtru chlazení	Žádné špony/vyčistit	Vizuálně																																
5	Zapast množství lubrikačního oleje VG68	Mezi min./max - Zapast hodnotu	Odčít měřky/doplnit																																
6	VG32 v zásobníku	Mezi min./max - Zapast hodnotu	Odčít měřky/doplnit																																
7	Trysky jsou v pozici pro obrábění	V pozici pro obrábění	Vizuálně																																
8	Zanesení sacího filtru chladicí kapaliny	Modrý plováček na červený -> vyčistit	Vizuálně - modrý plováček																																
9	Abnormality za automatického (pohyb zpět, vibrace...)	Žádné abnormality	Vizuálně, poslechem																																
X	V případě odstavení stroje vyplňte políčko v tomto řádku pomítkou [-]																																		

No.	Kontrola 1x týdně - pondělí	Hodnota	Způsob/položky
1	Zapast množství oleje hlavního vřetena VG2	Mezi min./max - Zapast hodnotu	Odčít měřky/doplnit
2	Vyčistit a vyčistit (vedlejší vřeteno)	Bez špon a nečistot	Čistota

No.	Kontrola 1x měsíčně - pondělí (1. týden)	Hodnota	Způsob/položky
1	Vyčistit kluzné vedení a křeslinu (hlavní vřeteno)	Bez špon a nečistot	Čistota
2	Únik vzduchu či oleje z potrubí, zařízení	Bez prasklin a úniků kapalin	Vizuálně, poslechem
3	Zkontrolovat poškození tlakové měřky	Tlak měřky bez prasklin	Vizuálně

No.	Kontrola každé 2 měsíce - každý lichý měsíc	Hodnota	Způsob/položky
1	Znečištění chladicího ventilátoru	Filtr bez nečistot	Čistota/výměna filtru

No.	Kontrola 2x ročně - březen/září	Hodnota	Způsob/položky
1	Namazaání kolenní páky	Namazaáno	Manuální

No.	Kontrola 1x ročně - dle data uvedeného na baterii	Hodnota	Způsob/položky
1	Výměna baterií v jednotce	Vyměněno	Manuální

Rozšíř kontrola stroje dle plánu roční údržby

Použití oleje	Viskozita
Chladicí emulze: viz šítek na stroji	-
Lubrikační olej: MOBIL VACTRA OIL NO.2	VG68
Hydraulický olej: MOBIL NUTO H 32	VG32
Oil hlavního vřetena: MOBIL Velocite OIL NO.3	VG2
Vazelina: Multi Purpose No.2	-
V podavači: MOBIL NUTO H 32	VG32
Kolenní páka vřetene: GLEI TLACK Spray - MOS2	-

**Způsob kontroly:**  
 1) kontrola na začátku směny  
 2) hodnotení: správně O nesprávně X (při doplnění oleje/kapaliny vyplňte znakem □)  
 3) v případě určené číselné hodnoty, zadejte hodnotu skutečného měření  
 4) V případě zapsání hodnoty X volejte svého nadřízeného

Datum	Popis revize	Zrevizoval	Značka

CA  
MOBIL  
PSE

MOB  
MOBIL  
AM

GLEI  
MOBIL  
V

Obr. 22) Inspekční list závodu SMC ve Vyškově

#### 4.1.2 Automatický soustruh CNC

Předmětem zájmu se stal dvou-vřetenový automatický soustruh CNC. Závod SMC ve Vyškově používá ve svém provozu řadu zařízení stejného typu.

Automatický soustruh CNC je pětiosý obráběcí stroj a mezi jeho hlavní přednosti patří zejména:

- Možnost obrábět součásti do průměru 38 mm.
- Zahrnuje až 31 nástrojových pozic a dále technologii „Dvojitě vřeteno“, které umožňuje pevnější držení obráběné součásti.
- Umožňuje rychloposuv do 45 m/min.



Obr. 23) Automatický soustruh CNC

Obráběcí stroje daného typu jsou v závodě v provozu od února roku 2013. Stroje jsou tedy relativně nové, a proto výskyt poruch u nich byl dosud ojedinělý. Do již vyskytnutých poruch s vyšším dopadem na provozuschopnost stroje, v rámci všech přítomných CNC zařízení, se může řadit špatně ustanovený stroj při zavádění stroje do provozu, jedna porucha ložiska hlavního vřetene, jedna výměna kleštiny z důvodu výrobní vady a zjištěné abrazivní opotřebení v lyžích vedení zadního vřetene.

Tab 11) Parametry automatického soustruhu CNC

Parametry automatického soustruhu CNC				
Rozsah obrábění	Max. pracovní průměr tyčového materiálu	38 mm	Celková kapacita uskladnění nástrojů	31 nástrojových pozic
	Max. délka obrobku	250 mm	Rychlost rychloposuvu	45 m/min
	Rychlost hlavního vřetena	200 až 6000 min <sup>-1</sup>	Rychlost zadního vřetena	200 až 7000 min <sup>-1</sup>
Motory	Hlavní vřeteno	7,5/11 kW	Z1	1,2 kW
	Zadní vřeteno	3,7/5,5 kW	X1, Y1	0,75 kW
	Příčný vrták předního a zadního držáku nástroje	1,0 kW	X2, Z2	2,5 kW
Ostatní	Požadavky na zdroj el. energie	3 W	Šířka x hloubka x výška	2520 x 1345 x 1970
	Požadavky na stlačený vzduch	0,4 MPa nebo více	Hmotnost	4600 kg
	Objem zásobníku chladiva	195 l		

## 4.2 FMEA automatického soustruhu CNC

Z důvodu počáteční analýzy našeho předmětu zájmu, tedy automatického soustruhu CNC, byla provedena analýza způsobů a důsledků poruch FMEA. Z realizace této analýzy byly zjištěny rizikové prvky subsystémů stroje a dostal se ucelený a kompletní přehled o složení stroje jako takového.

Postup analýzy probíhal dle platné normy ČSN EN 60 812. První úkol spočíval ve vytvoření doporučeného diagramu (obr. 24, 25, 26) celého systému CNC stroje. Systém je postupně rozdělen na dílčí subsystémy, komponenty a prvky. Každý jednotlivý prvek je obohacen o své vlastní indexové číslo, které dále napomáhá v korelaci mezi dalšími částmi analýzy FMEA. K diagramu jsou pro lepší přehlednost vytvořeny tři výkresy, které popisují umístění komponentů a prvků ve stroji (obr. 27, 28 a 29)

Druhý úkol spočíval v rozčlenění do přehledné tabulky. Obr. 30 obsahuje ukázkovou tabulku. Každý prvek je popsán svým indexem, jménem, funkcí, možnými poruchami, důsledky těchto poruch a metodami detekce jednotlivých poruch. Poruchy jsou dále klasifikovány dle (3) v kapitole 2.2, tedy číslem RPN vyjadřující prioritu rizika. Klasifikace je provedena na základě odborné konzultace pracovníků firmy a přeložených podpůrných článků v kapitole 2.1.1 a 2.1.2.

K vyhodnocení čísla RPN, resp. klasifikačních čísel S, O a D byly použity firmou vytvořené klasifikační tabulky (tab. 12, 13 a 14). Hodnoty vyhodnocených čísel mají tak pro firmu z hlediska zvolené strategie údržby větší význam, než by měly hodnoty vyhodnocené z předem vytvořených tabulek od jiného zdroje.

Tab 12) Klasifikační hodnoty pro kritérium významu poruchy (vady) S

kritérium klasifikace významu poruchy (vady) S	klasifikace S
Lehká porucha, opravu zvládne operátor výroby.	1 - 3
Porucha řešena interně pracovníky údržby. Odstavení stroje na krátkou dobu.	4 - 6
Odstavení stroje na středně dlouhou dobu. Porucha stále nemá následek na jiné části stroje než poškozený komponent.	7
Porucha má za následek poškození jiných komponent stroje. Nutnost opravy autorizovaným servisem	8 - 9

Tab 13) Klasifikační hodnoty pro kritérium výskytu způsobu poruchy (vady) O

kritérium klasifikace výskytu způsobu poruchy (vady) O	klasifikace O
Porucha se od doby prvního uvedení do provozu nevyskytla. Pravděpodobnost výskytu poruchy zanedbatelná.	1 - 2
Porucha se od doby prvního uvedení do provozu nevyskytla. Pravděpodobnost výskytu poruchy střední.	3
Porucha se od doby prvního uvedení do provozu již vyskytla. Pravděpodobnost výskytu poruchy vysoká.	4 - 5
Porucha se pravidelně vyskytuje během provozní doby stroje.	6 - 9

Tab 14) Klasifikační hodnoty pro kritérium odhalitelnosti poruchy (vady) D

kritérium klasifikace odhalitelnosti poruchy (vady) D	klasifikace D
Pracovník pozná poruchu téměř okamžitě a včas.	1 - 2
Pracovník pozná poruchu během krátké doby a včas.	3
Pracovník pozná poruchu během dlouhé doby a včas.	4
Závada je skrytá. Porucha je identifikovaná až z důvodu navazující poruchy jiného prvku či komponentu.	5
Závada je skrytá. Porucha je identifikovaná až z důvodu navazující poruchy jiného prvku či komponentu vážného charakteru.	6 - 10

Číslo priority rizika RPN bylo klasifikováno jako hodnota s vyšším rizikem po vyhodnocení a překročení hodnoty 70. Bylo tedy určeno osmnáct prvků s vyšším rizikem poruchy, než ostatní prvky systému, resp. obráběcího stroje. Výsledky jsou znázorněny v tab. 15. Prvky vodící šroub kluzného vedení a kluzné vedení jsou zkráceně znázorněny se stejnou hodnotou čísla RPN pro osy X1, X2, Y1, Y2, Z1 a Z2.

Zvýšená čísla priority rizika RPN jsou převážně vyvolány vysokou hodnotou klasifikačního kritéria významu poruchy S a poruchy těchto komponent by způsobily vysoké ekonomické ztráty a vysoké nároky na odbornost servisního zásahu.

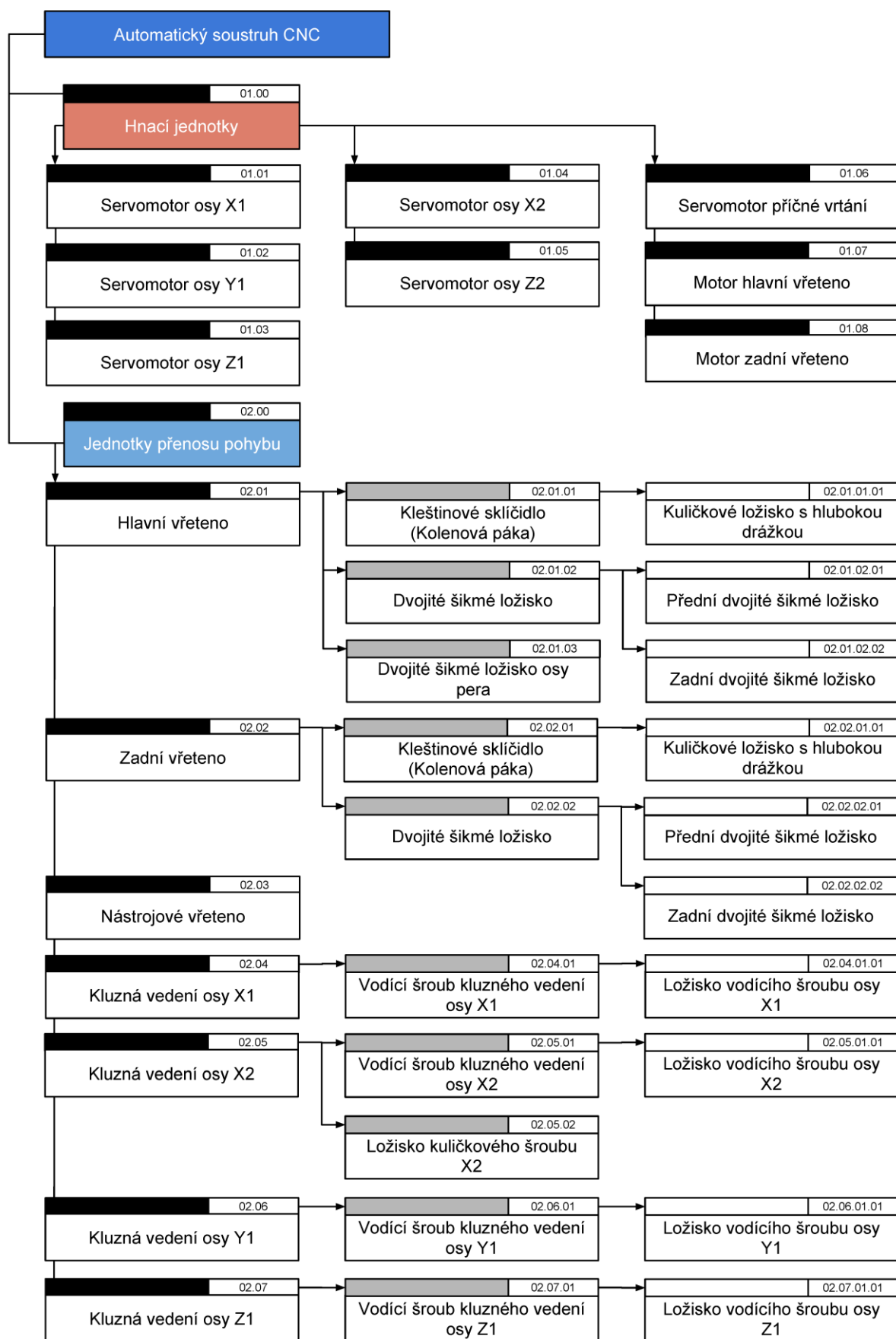
Některé potenciální způsoby poruch mají v současném preventivním systému údržby svá opatření před výskytem. Vysoké číslo RPN je důkazem, že tato zavedená údržbová opatření jsou funkční. Např. u sacího filtru se svou nejvyšší hodnotou RPN 160 je zavedena denní kontrola zanesení tohoto filtru a kluzná vedení společně s kleštinou kleštinového sklíčidla pro hlavní a zadní vřeteno (RPN 81 a 72) jsou kontrolována a čištěna měsíčně.

Pro vyhodnocení aktuálního technického stavu stroje byla vybrána vibrační diagnostika (kapitola 4.3) z důvodu vysoké hodnoty čísla priority rizika RPN 144 u hlavního vřetena a z důvodu nedostatečně zavedených opatření výskytu poruchy vřetene v systému údržby. Metodika měření vibrodiagnostiky byla navržena dle kapitoly 3.1.3.



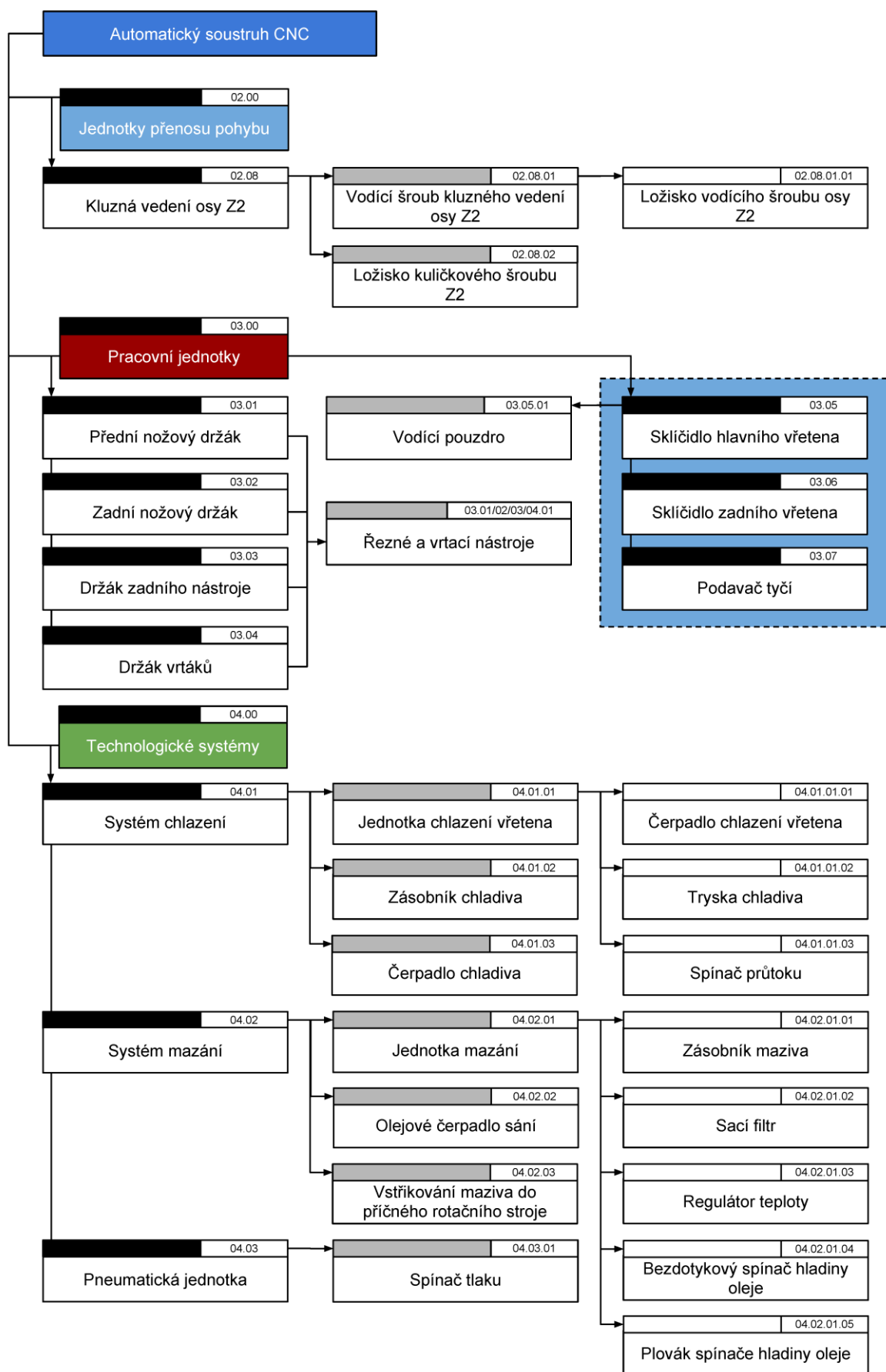
Tab 15) Prvky obráběcího stroje s vysokou hodnotou rizikového čísla RPN

Odkaz na objekt	Název	Způsob poruchy	Metoda detekce	O	D	S	RPN
02.01.01	Kleštinové skličidlo hlavního vřetena	Uvolněné kleštinové skličidlo hlavního vřetena	Vizuální kontrola, vibrodiagnostika, měření upínací síly, diagnostika přesnosti os rotace, laserová interferometrie	4	3	6	72
02.01	Hlavní vřeteno	Hlučné vřeteno	Hluková diagnostika, vibrodiagnostika, vyšší četnost zmetků	4	4	9	144
02.02.01	Kleštinové skličidlo zadního vřetena	Uvolněné kleštinové skličidlo zadního vřetena	Vizuální kontrola, vibrodiagnostika, měření upínací síly, diagnostika přesnosti os rotace, laserová interferometrie	4	3	6	72
02.04/05/06 /07/08.01	Vodící šroub kluzného vedení	Opatření, odírání Koroze	Vibrodiagnostika, diagnostika tepelných vlivů, hluková diagnostika, vizuální kontrola vodícího šroubu, vyšší četnost zmetků	3	3	9	81
02.04/05/06 /07/08	Kluzná vedení	Opatření, odírání Koroze	Vibrodiagnostika, diagnostika tepelných vlivů, vizuální kontrola vodícího šroubu, vyšší četnost zmetků	3	3	9	81
04.01.01.01	Čerpadlo chlazení vřetena	Čerpadlo se nadměrně zahřívá	Chybové hlášení 1003 QF301 pro přetížení nebo zkrat napájecích vedeních pro okruh čerpadla, 1003 FR311, vizuální kontrola průtoku chladiva, diagnostika určení tepelných vlivů, vyšší opotřebení řezných a vrtacích nástrojů	3	4	7	84
04.01.03	Čerpadlo chladiva	Čerpadlo se nadměrně zahřívá	Chybové hlášení 1003 QF301 pro přetížení nebo zkrat napájecích vedeních pro okruh čerpadla, 1003 FR310 pro přetížení nebo zkrat na čerpadle přívodu chladiva, 1003 FR13, diagnostika určení tepelných vlivů, vizuální kontrola průtoku chladiva, vyšší opotřebení chladicích komponentů	3	4	7	84
04.02.01.02	Sací filtr	Zanesení olejového filtru	Vizuální kontrola olejového filtru, vedení údržbašský záznamu o výměně olejového filtru	4	5	8	160
04.02.01	Jednotka mazání	Zadření kluzného vedení Zadření mazacího ložiska	Chybové hlášení 1008 o nízké hladině mazacího oleje pro kluzné vedení, vizuální kontrola zásobníku maziva, vizuální kontrola olejového filtru, vibrodiagnostika, vyšší četnost zmetků	3	3	9	81
04.02.02	Olejové čerpadlo sání	Čerpadlo se nadměrně zahřívá	Chybové hlášení 1003 QF302 o přetížení nebo zkratu na olejovém čerpadle sání, diagnostika určení tepelných vlivů, vizuální kontrola průtoku maziva	3	4	7	84

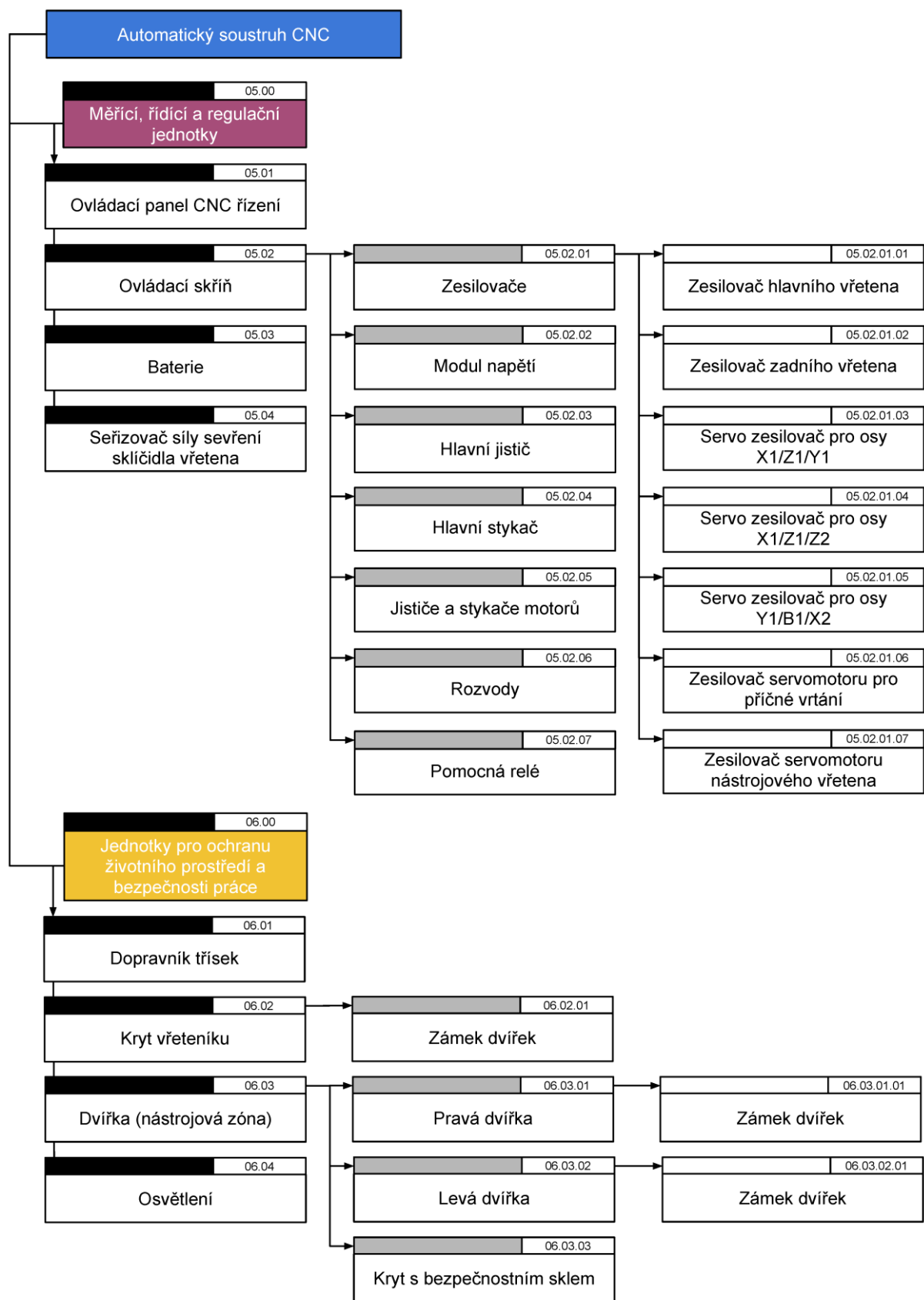


Obr. 24) Diagram systému automatického soustruhu CNC strana 1.

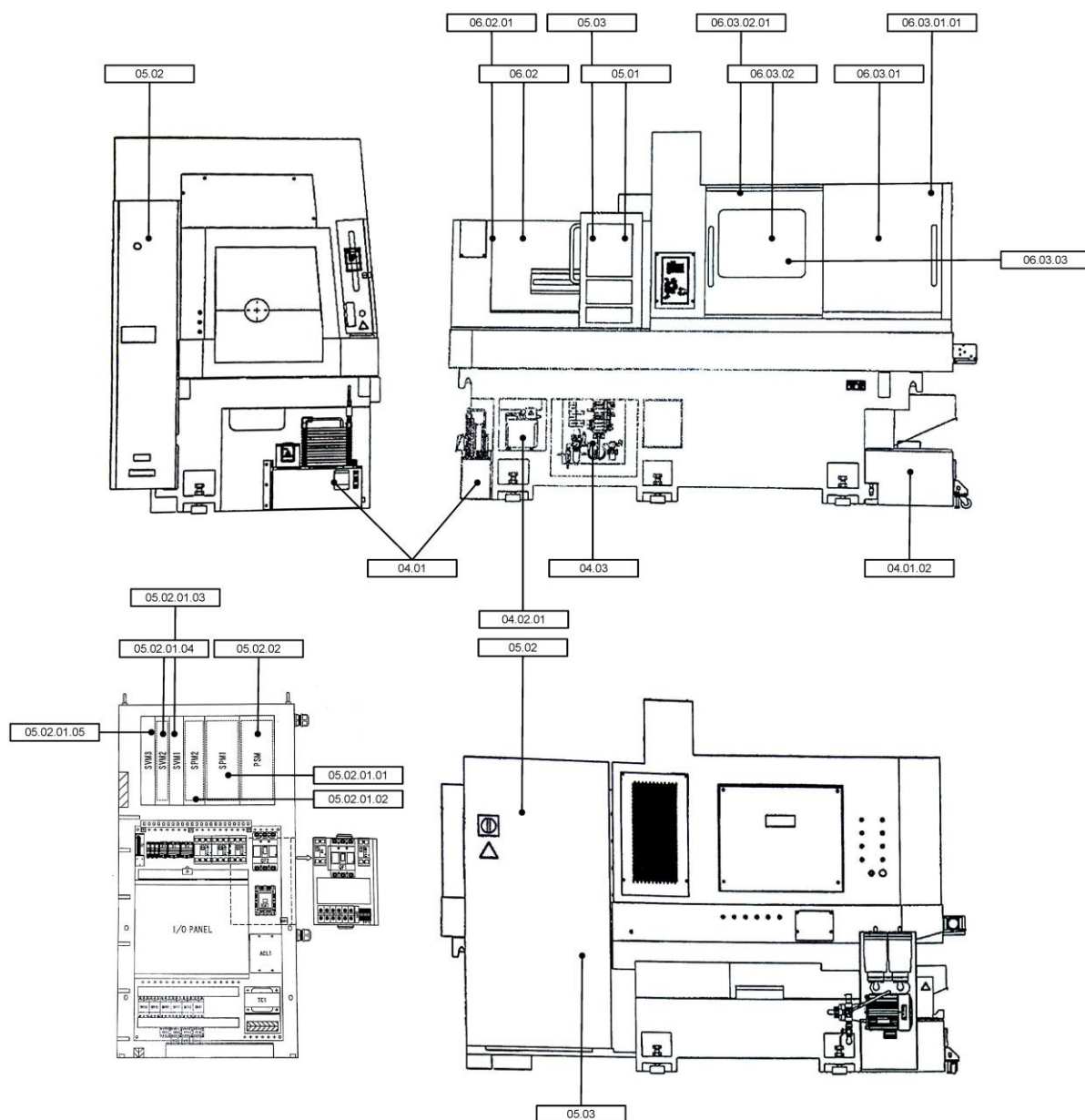




Obr. 25) Diagram systému automatického soustruhu CNC strana 2.



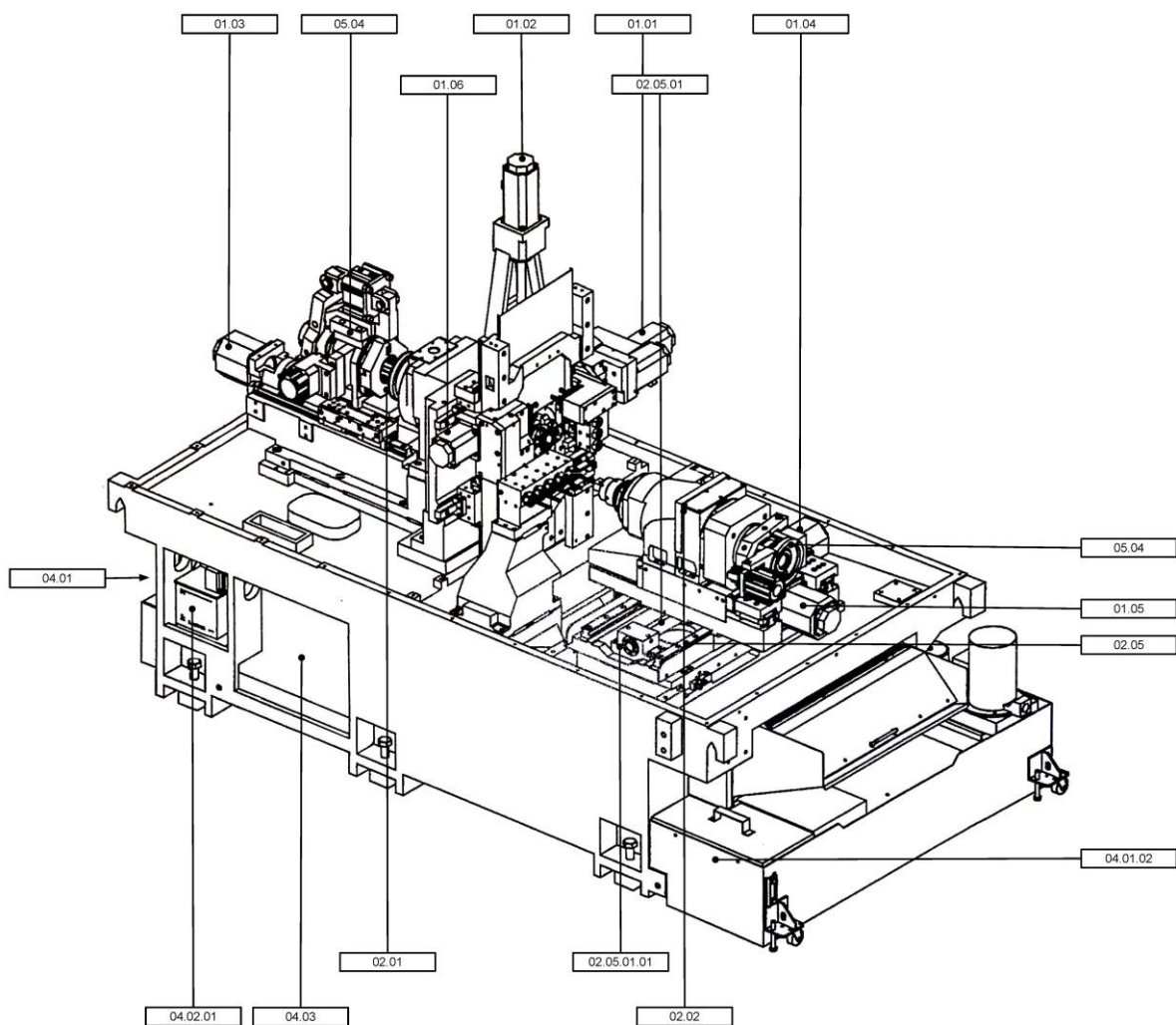
Obr. 26) Diagram systému automatického soustruhu CNC strana 3.



Obr. 27) Schéma vnějšího pohledu automatického soustruhu CNC

Tab 16) Seznam součástí vnějšího pohledu automatického soustruhu CNC

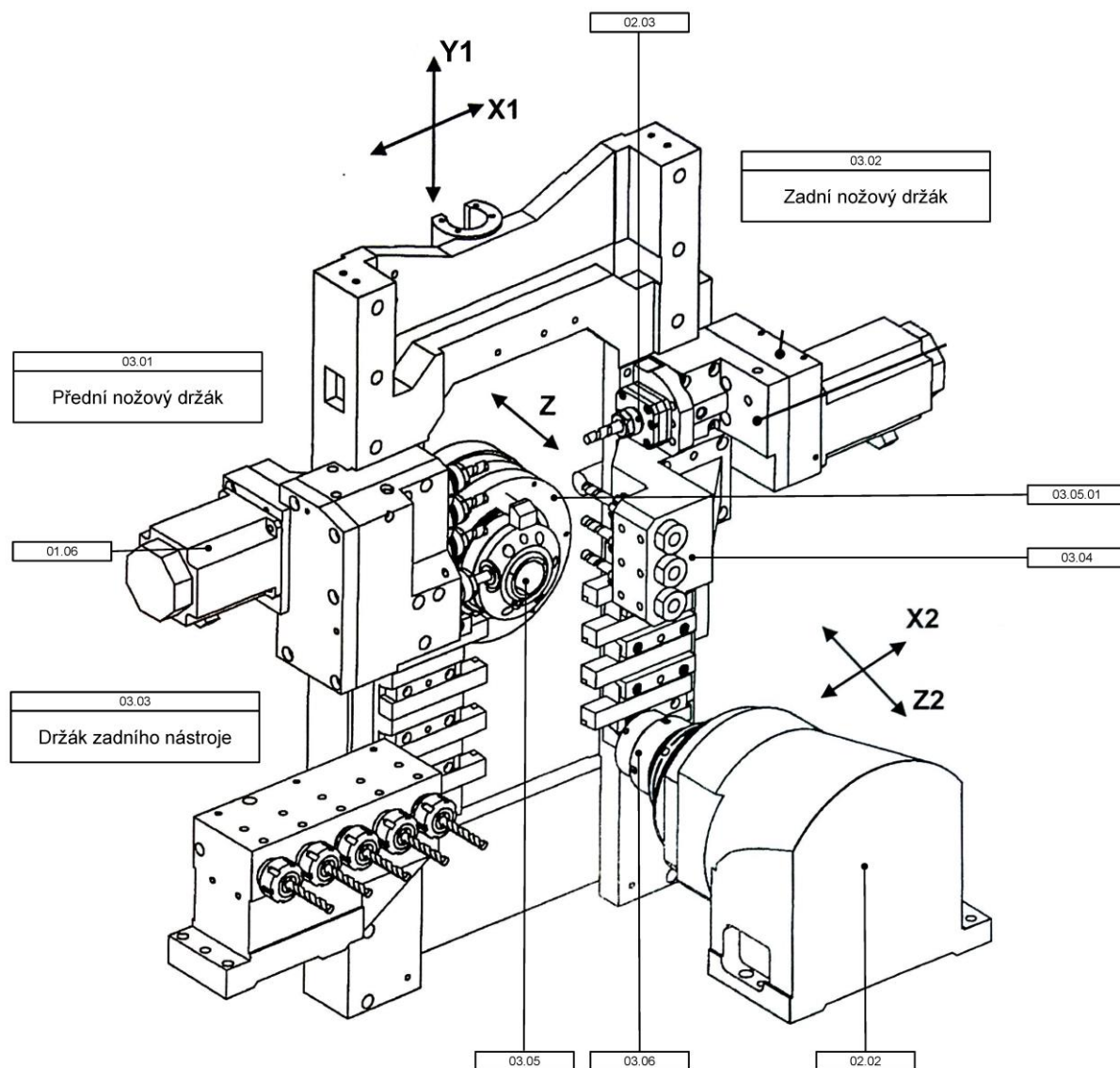
04.01	Systém chlazení	05.02.01.05	Servo zesilovač pro osy Y1/B1/X2
04.01.02	Zásobník chladiva	05.02.02	Modul napětí
04.02.01	Jednotka mazání	05.03	Baterie
04.03	Pneumatická jednotka	06.02	Kryt vřeteníku
05.01	Ovládací panel CNC řízení	06.02.01	Zámek dvířek
05.02	Ovládací skříň	06.03.01	Pravá dvířka
05.02.01.01	Zesilovač hlavního vřetena	06.03.01.01	Zámek dvířek
05.02.01.02	Zesilovač zadního vřetena	06.03.02	Levá dvířka
05.02.01.03	Servo zesilovač pro osy X1/Z1/Y1	06.03.02.01	Zámek dvířek
05.02.01.04	Servo zesilovač pro osy X1/Z1/Z2	06.03.03	Kryt s bezpečnostním sklem



Obr. 28) Schéma komponentů automatického soustruhu CNC

Tab 17) Seznam součástí schématu komponentů automatického soustruhu CNC

01.01	Servomotor osy X1	02.05	Kluzná vedení osy X2
01.02	Servomotor osy Y1	02.05.01	Vodící šroub kluzného vedení osy X2
01.03	Servomotor osy Z1	02.05.01.01	Ložisko vodícího šroubu osy X2
01.04	Servomotor osy X2	04.01	Systém chlazení
01.05	Servomotor osy Z2	04.01.02	Zásobník chladiva
01.06	Servomotor příčné vrtání	04.02.01	Jednotka mazání
02.01	Hlavní vřeteno	04.03	Pneumatická jednotka
02.02	Zadní vřeteno	05.04	Seřizovač síly sevření sklíčidla vřetena



Obr. 29) Schéma nástrojové zóny automatického soustruhu CNC

Tab 18) Seznam součástí schématu nástrojové zóny automatického soustruhu CNC

01.06	Servomotor příčné vrtání	03.03	Držák zadního nástroje
02.02	Zadní vřeteno	03.04	Držák vrtáků
02.03	Nástrojové vřeteno	03.05	Skříňadlo hlavního vřetena
03.01	Přední nožový držák	03.05.01	Vodící pouzdro
03.02	Zadní nožový držák	03.06	Skříňadlo zadního vřetena

FMEA SYSTÉMU				Koncový objekt: Automatický soustruh CNC		Vypracoval: Petr Semotam		List 09/22											
Odkaz na objekt		Název	Popis a funkce objektu	Způsob poruchy		Možné příčiny poruchy		Důsledky způsobu poruch		Metoda detekce		O		D		S		RPN	
02.02	Zadní vřeten	Přenos otáčivého pohybu	Hlučné vřeten	Nepřesnost synchronizace os	Poškození ložiska	Zvýšená úroveň hluku, nepřesnost výroby, vyšší úroveň vibrací	Hluková diagnostika, vibrodiagnostika, vyšší četnost zmetků	2	3	9								54	
					Překročení mezní hodnoty kompenzace chyby během synchronizace otáčení hlavního a zadního vřetena	Nepřesnost výroby, zastavení stroje	Chybové hlášení 1052, vizuální kontrola, vyšší četnost zmetků, diagnostika přesnosti os rotace, laserová interferometrie	2	3	6							36		
02.03	Nástrojové vřeten	Přenos otáčivého pohybu	Hlučné vřeten		Poškození ložiska	Zvýšená úroveň hluku, nepřesnost výroby, vyšší úroveň vibrací, možnost poškození spojky	Hluková diagnostika, vibrodiagnostika, vyšší četnost zmetků	2	3	7								42	
02.04.01.01	Ložisko vodícího šroubu osy X1	Snížení tření při vzájemném otáčivém pohybu strojních dílů	Odloupávání povrchu materiálu ložiska		Tepelné přetížení ložiska	Zvýšená úroveň vibrací strojních součástí, zvýšená úroveň hluku, zvýšená úroveň teploty, zvýšená opotřebení strojních součástí celého systému, nepřesnost výroby, vyšší počet zmetků	Vibrodiagnostika, diagnostika tepelných vlivů, hluková diagnostika, vizuální kontrola ložiska, vyšší četnost zmetků	2	4	7								56	
			Pitting (únava materiálu)		Konec životnosti ložiska, přetížení, nedostatečné mazání														
			Prohlubeniny a otlaky		Konec životnosti ložiska, přetížení, nedostatečné mazání, přítomnost nečistot v mazacím oleji, nešetřná montáž ložiska														
			Odírání		Přetížení, nedostatečné mazání														
			Opotřebení		Nedostatečné mazání														
			Koroze		Použití nevhodného maziva, přítomnosti vlhkosti v prostoru ložiska														
02.04.01	Vodící šroub kluzného vedení osy X1	Přenos rotačního pohybu (pohonu) na lineární posuv	Opotřebení, odírání	Nedostatečné mazání, přítomnost nečistot na vodícím šroubu	Zvýšená úroveň vibrací strojních součástí, zvýšená úroveň hluku, zvýšená úroveň teploty, zvýšená opotřebení strojních součástí celého systému, nepřesnost výroby, vyšší počet zmetků	Vibrodiagnostika, diagnostika tepelných vlivů, hluková diagnostika, vizuální kontrola vodícího šroubu, vyšší četnost zmetků	3	3	9								81		
			Koroze	Použití nevhodného maziva, přítomnosti vlhkosti v prostoru vodícího šroubu															

Obr. 30) Příkladový list tabulky FMEA pro automatický soustruh CNC



### 4.3 Vibrodiagnostika automatického soustruhu CNC

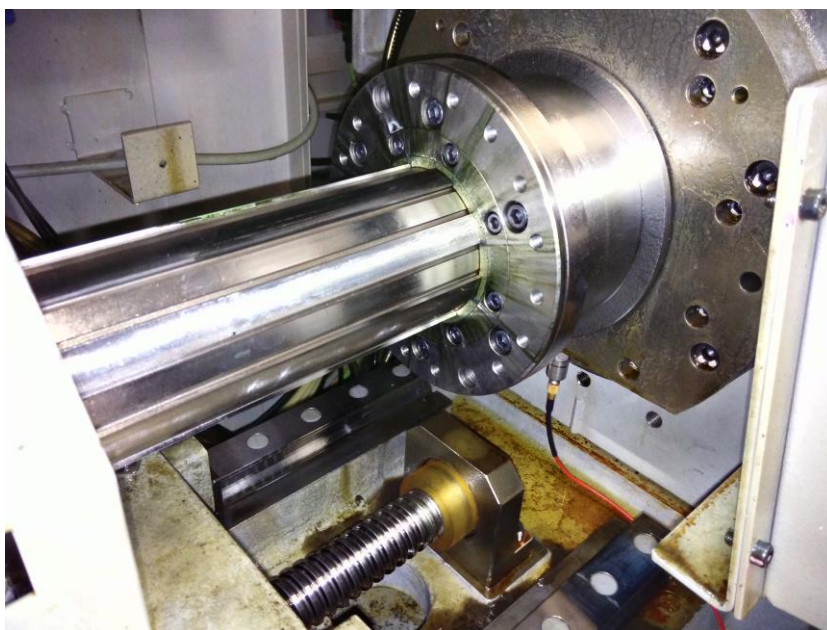
Měření vibrací bylo provedeno na dvou obráběcích strojích CNC interního názvu LT09 a LT10. Stroje jsou stejné typu a mají společného výrobce. Obě obráběcí zařízení byla změřena dvěma snímači zapojenými v axiálním směru v místě předpokládaných vibrací hlavního vřetene (obr. 31). Jako měřicí analyzátor byl použit čtyř-kanálový univerzální analyzátor signálu typu CMXA80 a CMXA48 (obr. 32).

Měření bylo dále provedeno při postupné změně otáček v rozsahu 500 – 5500 ot./min. s následným snížením otáček na hodnotu 4000 ot./min. s krokem 500 ot./min. Doba měření při jednom kroku činila přibližně 10 s.

Analýza změřených dat proběhla v programu Analysis and Reporting Manager software<sup>35</sup>.

Použité snímače:

- CMSS 2011
  - citlivost 100 mV/g, frekvenční rozsah 0,5 – 10.000 Hz
- CMSS 732AT (vysokofrekvenční)
  - citlivost 10 mV/g, frekvenční rozsah 0,5 – 25.000 Hz



Obr. 31) Zapojení vysokofrekvenčního snímače v axiálním směru

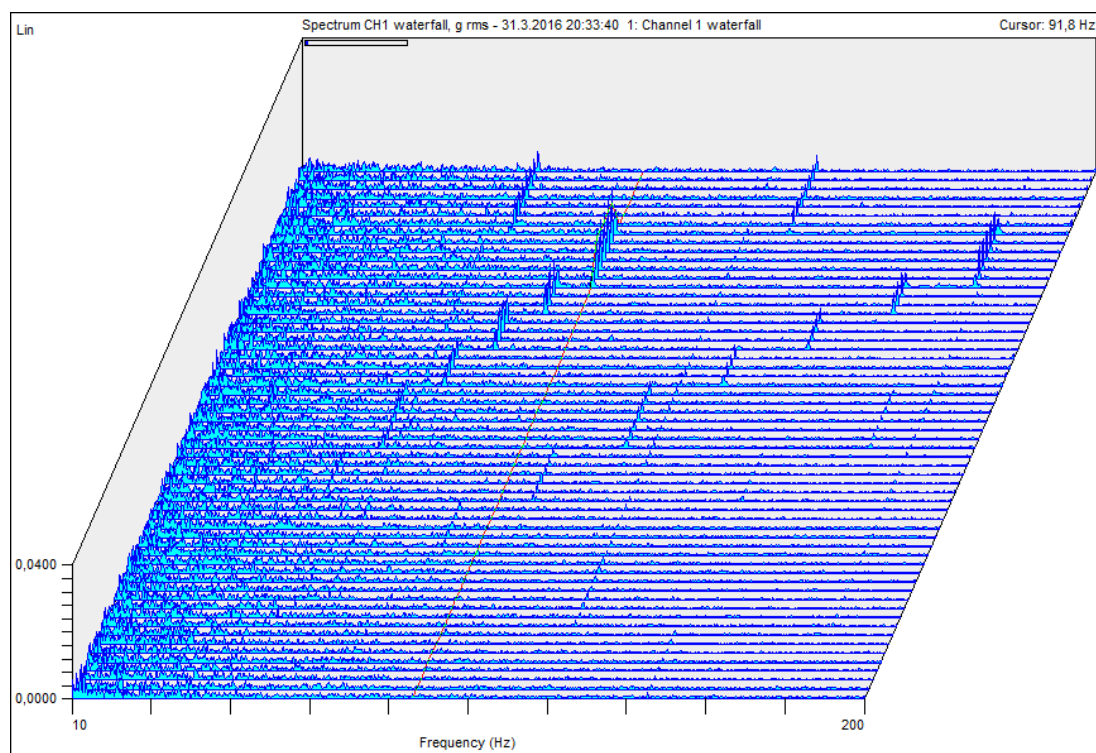
<sup>35</sup> Analysis and Reporting Manager (ARM) od společnosti SKF je počítačová podpůrná aplikace pro SKF Microlog, která zajišťuje automatický přenos, zobrazování a analýzu naměřených dat generovaných aplikačními moduly nástrojů SKF Microlog série AX a GX.



Obr. 32) Ukázka zapojení analyzátoru s vysokofrekvenčním snímačem

Ze zjištěných dat byla provedena tzv. spektrální analýza, která v podstatě spočívá v převodu sledovaného signálu z časové do frekvenční oblasti. Tento převod je realizován výpočtovým algoritmem (rychlá Fourierova transformace FFT) (kapitola 3.1.3).

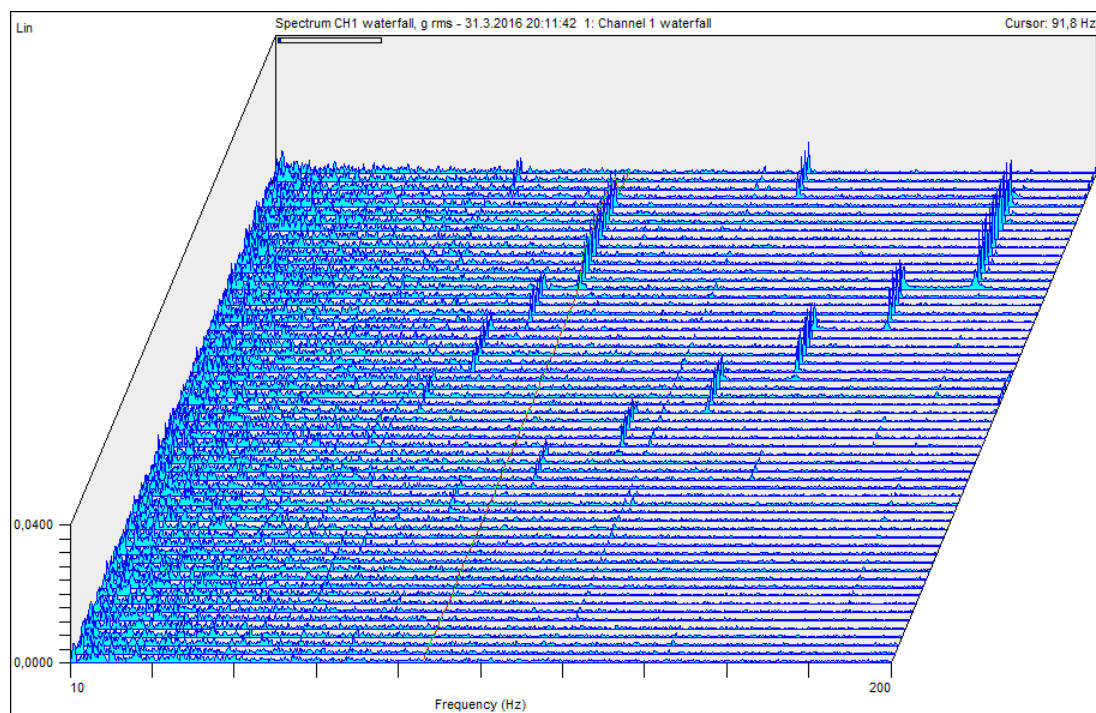
Frekvenční spektrum měřeného objektu LT09 lze vidět na obr. 33. Z grafického zobrazení lze vyčíst schodovitý tvar výšky amplitudy zapříčiněný změnou otáček, a dále, že nejvyšší amplitudová výchylka vznikla při přibližné frekvenci 91,8 Hz, což odpovídá nejvýše dosaženým otáčkám stroje o hodnotě 5500 ot./min.



Obr. 33) Frekvenční spektrum změřených dat stroje LT09



Ze znázornění frekvenčního spektra změřených dat stroje LT10 (obr. 34) lze opět zjistit nejvyšší hodnotu amplitudy při nejvyšších otáčkách 5500 ot./min, což odpovídá frekvenci 91,8 Hz. Hodnota amplitudy stroje LT10 v porovnání s hodnotou amplitudy stroje LT09 je mírně vyšší. Vyšší vibrace mohou být zapříčiněny např. vyšší vůlí mezi ložiskem a vřetenem.



Obr. 34) Frekvenční spektrum změřených dat stroje LT10

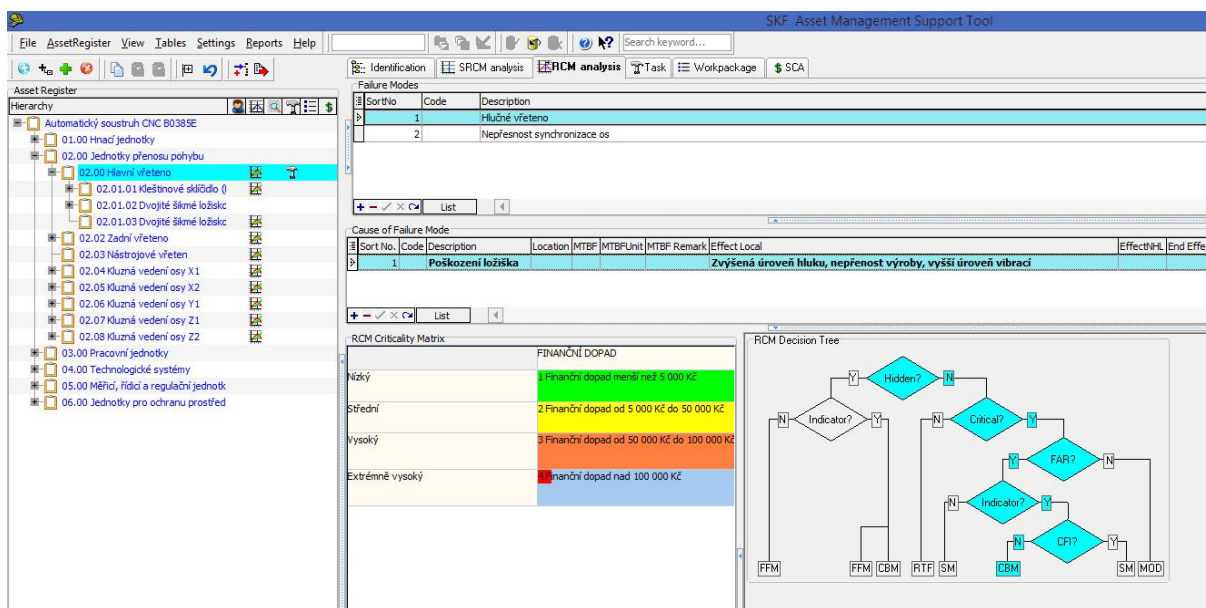
Z měření obou obráběcích soustruhů CNC LT09 a LT10 je možné vyvodit závěr, že oba stroje jsou v době měření v dobrém technickém stavu. Z analýzy změřených dat nebyly zjištěny žádné extrémní hodnoty naznačující poruchu v systému CNC stroje.

#### 4.4 Další postup a doporučení v oblasti řešení problematiky údržby v SMC

Z výsledků analýzy způsobů a důsledků poruch FMEA/FMECA a následného zjištění technického stavu komponentu s vysokou hodnotou priority rizika RPN, resp. hlavního vřetene, je možné, v současném stavu zavedeného systému údržby, doporučit další postupné zavádění prediktivních prvků údržby.

Např. vibrační diagnostika ukázala velice efektivní způsob zjištění technického stavu hlavního vřetene. Závěr analýzy sice vyhodnotil obě měřená hlavní vřetena v technicky bezvadném stavu, ale v případě nalezení vyšších nestandardních hodnot sledovaných veličin by se mohlo zamezit v extrémním případě až degradační poruše. Toto včasné zamezení by bylo ve výrazně nižší ekonomické náročnosti a i nižší náročnosti na odbornost servisu.

Další postup je specifikován v rozvoji proaktivního systému údržby. Postupným zavedením počítačového údržbářského systému, tedy jeho zcentralizování, popřípadě i zavedením monitoringu spolu s vizualizací dat pro pracovníky údržby se dá i přes náročné prvotní ekonomické požadavky dosáhnout výrazného zlepšení v provozní spolehlivosti výrobních strojů. Program řízení údržby ve spolupráci se zvolenou koncepcí a strategií údržby (TPM, RCM) je velmi silný nástroj pro zvýšení efektivity výroby a snížení rizika nebezpečí poruch.



Obr. 35) Ukázka uživatelského rozhraní softwaru řízení údržby SKF Asset Management Support Tool<sup>36</sup>

<sup>36</sup> Program Asset Management Support Tool od společnosti SKF je zaměřen na generování optimální koncepce údržby, validaci/posílení a řízení stávající koncepce údržby. [38]

## 5 ZÁVĚR

V začátku bakalářské práce je téma údržby obecně popsáno v korelaci s provozní spolehlivostí a koncepcí proaktivního systému údržby se svými náležitostmi a se zaměřením na obráběcí stroje. Jsou popsány nejčastější poruchy obráběcích zařízení a rozšířené diagnostické metody vhodné k určení technického stavu obráběcího stroje v rámci systému údržby.

K důležitým náležitostem patří i metody analýz spolehlivosti a rizik. Vybraná analýza způsobů a důsledků poruch FMEA/FMECA byla popsána, byl naznačen její další možný vývoj a následně i vyzkoušena v praktické části bakalářské práce k vyhodnocení rizik komponentů vybraného automatického soustruhu CNC používaného v provozech firmy SMC Industrial Automation CZ s.r.o. Vyškov.

Ve výsledku analýzy FMEA/FMECA byl jako komponent s nejvyšší hodnotou čísla priority rizika RPN zjištěno přední vřeteno automatického soustruhu CNC. Nejvhodnější metoda detekce způsobů poruch spočívala ve vibrační diagnostice, z toho důvodu byla následně využita k určení technického stavu CNC stroje.

Vibrodiagnostikou změřená data byla zpracována a analyzována se závěrem o bezvadném stavu vybraných dvou automatických soustruhů CNC. Veškerý proces byl vyhodnocen jako efektivní nástroj systému údržby a byl doporučen spolu se zavedením konceptu prediktivního a proaktivního systému údržby do provozu firmy SMC ve Vyškově.

Bakalářskou práci lze rozšířit např. využitím dalších metod vibrační diagnostiky k vyhodnocení technického stavu a jejich aplikací na vyšší počet obráběcích zařízení v širším časovém horizontu, zavedením programu řízení údržby se stanovenou koncepcí údržby nebo ekonomickými výpočty efektivnosti a návratnosti investic do zavedení proaktivního systému údržby nebo jeho části.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN EN 13306. *Údržba - Terminologie údržby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [2] ČSN IEC 50(191). *Medzinárodný elektrotechnický slovník. Kapitola 191: Spôľahlivosť a akosť služieb*. Bratislava: Československý inštitút technickej normalizácie a akosti, 1993.
- [3] ČSN EN 60300-2. *Management spoľehlivosti - Část 2: Směrnice pro management spoľehlivosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [4] KRATOCHVÍL, Pavel. *Údržba obráběcích strojů - snížení rizika poruch a úspory. TechMagazín: měsíčník pro technické obory, vědu, výzkum, strojírenství, plastikářský a automobilový průmysl, IT a technické školství*. Praha: Tech Media Publishing, 2011, (1), 2. ISSN 1804-5413.
- [5] CHEN, Wei, Bo JIANG a Zhi JIA. Reliability Analysis for CNC Machining Tools during Early Failure Period. *Advanced Materials Research*. 2014, **988**(1), 663-667. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.988.663. ISSN 1662-8985. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/AMR.988.663>
- [6] SARAVANAN, S, G.S. YADAVA a P.V. RAO *Machine Tool Failure Data Analysis For Condition Monitoring Application*. New Delhi: Proceedings of the 11th National Conference on Machines and Mechanism, 2003. Dostupné také z: <http://nacomm03.ammindia.org/Articles/Mac004.pdf>
- [7] ČSN EN 60812. *Techniky analýzy bezporuchovosti systémů – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [8] CHANG, Kuei-Hu, Yung-Chia CHANG a Pei-Ting LAI. Applying the concept of exponential approach to enhance the assessment capability of FMEA. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2014, **25**(6), 1413-1427. DOI: 10.1007/s10845-013-0747-9. ISSN 0956-5515. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10845-013-0747-9>
- [9] Metoda FMEA, FMECA. MYKISKA, Antonín. *Bezpečnost a spoľehlivost technických systémů*. Vyd. 2. přeprac. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004, s. 122. ISBN 80-01-02868-2.

- [10] Struktura a obsah norem souboru ISO 9000:2000. MYKISKA, Antonín. *Bezpečnost a spolehlivost technických systémů*. Vyd. 2. přeprac. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004, s. 20. ISBN 80-01-02868-2.
- [11] VDOLEČEK, František. Technická diagnostika v systémech údržby. *AUTOMA*. 2008, **2008**(5), 3.
- [12] KRUPA, Miroslav. Prediktivní údržba a metody technické prognostiky: seznámení se s problematikou. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti*. 2011, **4**(4), 6. ISSN 1803-3687.
- [13] Model-based prognostic techniques. LUO, J, M NAMBURU, K PATTIPATI a L QIAUIO. *Future sustainment for military and aerospace*. 1. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2003, s. 330-340. ISBN 0-7803-7837-7.
- [14] Komplexní produktivní údržba. LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2013, s. 137. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [15] Základní pilíře TPM. LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2013, s. 141 - 143. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [16] Přínosy z implementace TPM. LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2013, s. 152 - 153. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [17] Diagnostika obecně. LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2013, s. 379. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [18] ČSN ISO 230-4. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [19] *Online instructions for using QC20-W and QC10 ballbar systems*. New Mills, United Kingdom, 2010.
- [20] JANKOVÝCH, , HAMMER, TURYGIN, ZHALO a VESELKOV. *Vibration Condition Monitoring in 21st Century*. Brno, 2015.
- [21] Vibrodiagnostika. LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2013, s. 387. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [22] *Profil společnosti: Základní informace o SMC* [online]. Brno: SMC Industrial Automation CZ s.r.o., 2015 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: [https://www.smc.eu/portal\\_ssl/webpages/04\\_news\\_events/press\\_room/company\\_profile/company\\_profile.jsp](https://www.smc.eu/portal_ssl/webpages/04_news_events/press_room/company_profile/company_profile.jsp)

- [23] *Kdo jsme: Co nás žene kupředu?* [online]. Brno: SMC Industrial Automation CZ s.r.o., 2015 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: [https://www.smc.eu/portal\\_ssl/webpages/05\\_about\\_smc/who\\_we\\_are/who\\_we\\_are.jsp](https://www.smc.eu/portal_ssl/webpages/05_about_smc/who_we_are/who_we_are.jsp)
- [24] What is a Standard Operating Procedure?. *Standard Operating Procedures* [online]. 2008 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://www.sop-standard-operating-procedure.com/>
- [25] MIL-STD-1629A. *MILITARY STANDARD: PROCEDURES FOR PERFORMING A FAILURE MODE, EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS*. Washington, DC: United States Department of Defense, 1980. Dostupné také z: <https://src.alionscience.com/pdf/MIL-STD-1629RevA.pdf>
- [26] Modulární koncepce posuzování shody. MYKISKA, Antonín. *Bezpečnost a spolehlivost technických systémů*. Vyd. 2. přeprac. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004, s. 44. ISBN 80-01-02868-2.
- [27] Údržba zaměřená na bezporuchovost (RCM). LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2013, s. 319. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [28] Hodnocení celkové efektivnosti zařízení. LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2013, s. 145. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [29] ČSN EN ISO 9000. *Systémy managementu kvality - Základní principy a slovník*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [30] POPELA, Pavel. ÚSTAV MATEMATIKY FSI VUT BRNO. *Rozdělení pravděpodobnosti pro aplikace* [online]. Brno, 2006 [cit. 27. 03. 2016]. Dostupné z: <http://mathonline.fme.vutbr.cz/Prilohy/sc-1207-sr-1-a-201/default.aspx>. Strana 20.
- [31] Normy souboru ISO 9000 a další normy pro oblast péče o jakost. MYKISKA, Antonín. *Bezpečnost a spolehlivost technických systémů*. Vyd. 2. přeprac. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004, s. 17. ISBN 80-01-02868-2.
- [32] ČSN P ISO/TS 16949. *Systémy managementu kvality - Zvláštní požadavky na používání ISO 9001:2008 v organizacích zajišťujících sériovou výrobu a výrobu náhradních dílů v automobilovém průmyslu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [33] Specifické normy v automobilovém průmyslu. *ISO - certifikace systémů řízení - ISO 9000 - ISO 14001* [online]. 2010 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://www.iso.cz/qs9000.html>
- [34] Metody plánování údržby. LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2013, s. 77. ISBN 978-80-7431-119-2.

- [35] Tribotechnická diagnostika. LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2013, s. 397. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [36] Termodiagnostika. LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2013, s. 407. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [37] Insourcing a outsourcing údržby. LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2013, s. 56 - 59. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [38] *SKF Asset Management Support Tool: User manual*. San Diego, USA, 2015.

## 7 SEZNAM SYMBOLŮ, ZKRATEK, OBRÁZKŮ A TABULEK

$t$ .....	čas
$x_j^*$ .....	střed třídy
$F_j$ .....	komulativní absolutní četnost
$\hat{\alpha}$ .....	parametr měřítka
$\hat{\beta}$ .....	tvárový parametr
$f(t)$ .....	funkce hustoty pravděpodobnosti (kapitola 2.1.1)
$f(t)$ .....	časová reprezentace (kapitola 3.1.3)
$\lambda(t)$ .....	funkce míry poruchovosti
$X$ .....	jakékoliv kladné celé číslo
$Z$ .....	množina celých čísel
$Q_f$ .....	hodnota frekvenčního spektra
$Q_{f(H)}$ .....	celkové vibrace zjištěné při použití Hanningova okna
$Q_f$ .....	celkové vibrace zjištěné při použití Flat Top okna
$y_i$ .....	amplituda i-té čáry ve frekvenčním spektru
$n$ .....	počet čar ve frekvenčním spektru
$\check{S}_p$ .....	šířka pásma šumu pro zvolené okno
$F(\xi)$ .....	frekvenční spektrum



FMEA	Failure Mode and Effects Analysis v překladu „Analýza způsobů a důsledků poruch“
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis v překladu „Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch“. Jedná se o logické rozšíření metody FMEA o odhad kritičnosti důsledků poruch a pravděpodobnosti jejich výskytu.
ETA	Z anglického Event tree analysis, tedy analýza stromu událostí.
FTA	Z anglického Fault Tree Analysis tedy analýza stromu poruchových stavů.
ISO	International Organization for Standardization v překladu „Mezinárodní organizace pro normalizaci“
EN	Evropská norma.
ČSN	ČSN je chráněné označení českých technických norem.
PDCA	Z anglického plan-do-check-act, čili „plánuj, udělej, zkontroluj, jednej“
CNC	Z anglického Computer Numeric Control, tedy obráběcí stroje počítačově číslicově řízené.
SOP	SOP neboli Standard operating procedure je operační postup pomáhající zvyšovat bezpečnost a provozní účinnost pro tyto druhy organizací: farmaceutické, vládní, výzkumné, energetické organizace a jednotky záchranného systému. [24]
MIL-STD	MIL-STD je zkratka pro Military standard neboli normu splňující požadavky Ministerstva obrany USA. [25]
IEC	Označení pro mezinárodní elektrotechnickou komisi.
AIAG	AIAG je zkratka pro Automotive Industry Action Group. AIAG je světově uznávanou organizací, v níž se sdružují dodavatelé a výrobci originálních dílů k projednávání a řešení záležitostí ovlivňujících celosvětový dodavatelský řetězec v automobilovém průmyslu.
CE	Značka CE vyjadřuje skutečnost, že výrobce dodržuje, resp. výrobek odpovídá základním požadavkům vyplývajících ze směrnic EU a že výrobce, dovozce, třetí strana atd. provedly všechny příslušné postupy posouzení shody, takže výrobek může být v zemích EU uváděn do oběhu bez omezení. [26]
RPN	Hodnota priority rizika [7]
ERP	Nová forma hodnoty priority rizika RPN (kapitola 2.2.1) [8]
S	S je bezrozměrné číslo, které klasifikuje závažnost, tedy odhad, jak silně budou důsledky poruchy ovlivňovat systém nebo uživatele. [7]
O	O je bezrozměrné číslo, které vyznačuje pravděpodobnost výskytu způsobu poruchy v daném časovém období. [7]

D	D je bezrozměrné číslo, které vyjadřuje míru detekce, tedy odhad zdali se porucha dokáže zjistit a eliminovat před tím, než bude mít na systém nebo uživatele vliv. [7]
$W_S, W_O, W_D$	Čísla $W_S, W_O, W_D$ jsou váhy přiřazené k číslům S, O a D v daném pořadí a dovolují výsledek čísla priority rizika ovlivnit dle námi zvolené významnosti kritéria významu poruchy, výskytu způsobu poruchy nebo odhalitelnosti poruchy. [8]
TPM	Total Productive Maintenance (TPM) v překladu „Komplexní produktivní údržba“. Je využíván i překlad „Totálně produktivní údržba“.
RCM	Reliability Centered Maintenance (RCM), v oficiálním překladu podle normy „Údržba zaměřená na bezporuchovost“. [27]
CEZ/OEE	Overall Equipment Effectiveness (OEE) v překladu „Celková efektivnost zařízení (CEZ) je funkcí ztrát, které jsou způsobeny poruchami, ztrátami výkonu vlivem redukované rychlosti a seřizovacími časy a také nízkou kvalitou vyráběných výrobků. [28]
G(b)	Dvousměrná odchylka kruhovitosti. [18]
G	Odchylka kruhovitosti G pro dráhu ve směru pohybu a/nebo proti směru pohybu (hodinových ručiček). [18]
D	Průměrná dvousměrná radiální odchylka, opravená na teplotu 20°C. [18]
$F_{\max}, F_{\min}$	Radiální odchylka $F_{\max}$ a $F_{\min}$ pro směr pohybu ve směru a proti směru pohybu (hodinových ručiček), opravené na teplotu 20°C. [18]
OVERALL	Analýza „celkových hodnot“ vibrací [20]
FFT	Rychlá Fourierova transformace
OVERALL FFT	Celková hodnota frekvenčního spektra [20]
AEE	Měření a analýza obálky akustické emise [20]

Obr. 1)	Definice spolehlivost [2].....	17
Obr. 2)	Životní cyklus výrobku [3] .....	17
Obr. 3)	Křivka funkce míry poruchovosti [5] .....	20
Obr. 4)	Výskyt poruch subsystémů [5] .....	21
Obr. 5)	Graf četnosti poruch subsystému a jejich doby do obnovy soustruhu [6] .....	22
Obr. 6)	Graf četnosti poruch subsystémů a jejich doby do obnovy frézky [6] .....	22
Obr. 7)	Schéma systému proaktivní údržby [11] .....	27
Obr. 8)	Čtyřfázový program implementace kroků TPM [16] .....	29
Obr. 9)	Diagnostikovatelnost jako součást definice spolehlivosti [3] .....	30
Obr. 10)	Ukázka změřené dvousměrné odchylky kruhovitosti G(b) programem firmy Renishaw [19] .....	32
Obr. 11)	Přístroj interferometr XL-80 značky Renishaw .....	33
Obr. 12)	Ukázka sestavení interferometru XL-80 a příslušenství značky Renishaw při kontrole odchylky měření délkoměru.....	33
Obr. 13)	Časový záznam zrychlení u poškozeného ložiska [20] .....	34
Obr. 14)	Frekvenční spektrum – princip analýzy [20] .....	35
Obr. 15)	Měření fáze při vibrační diagnostice [20].....	36
Obr. 16)	Polární vektorový graf [20].....	37
Obr. 17)	Časový záznam zrychlení obsahující složky od vadného ložiska [20].....	37
Obr. 18)	Časový průběh a frekvenční spektrum obálky [20].....	38
Obr. 19)	Frekvenční spektrum signálu AEE ložiska s poškozeným vnějším kroužkem [20] .....	39
Obr. 20)	Logo společnosti SMC [22] .....	40
Obr. 21)	Výrobní závod SMC Industrial Automation CZ s.r.o. ve Vyškově .....	41
Obr. 22)	Inspekční list závodu SMC ve Vyškově .....	43
Obr. 23)	Automatický soustruh CNC .....	44
Obr. 24)	Diagram systému automatického soustruhu CNC strana 1.....	48
Obr. 25)	Diagram systému automatického soustruhu CNC strana 2.....	49
Obr. 26)	Diagram systému automatického soustruhu CNC strana 3.....	50
Obr. 27)	Schéma vnějšího pohledu automatického soustruhu CNC .....	51
Obr. 28)	Schéma komponentů automatického soustruhu CNC .....	52
Obr. 29)	Schéma nástrojové zóny automatického soustruhu CNC .....	53
Obr. 30)	Příkladový list tabulky FMEA pro automatický soustruh CNC .....	54
Obr. 31)	Zapojení vysokofrekvenčního snímače v axiálním směru.....	55
Obr. 32)	Ukázka zapojení analyzátoru s vysokofrekvenčním snímačem.....	56
Obr. 33)	Frekvenční spektrum změřených dat stroje LT09 .....	56
Obr. 34)	Frekvenční spektrum změřených dat stroje LT10 .....	57
Obr. 35)	Ukázka uživatelského rozhraní softwaru řízení údržby SKF Asset Management Support Tool.....	58

Tab 1)	Rozložení frekvence selhání [5] .....	20
Tab 2)	Výskyt poruch subsystémů [5] .....	21
Tab 3)	Historie vývoje metody FMEA [8] .....	23
Tab 4)	Klasifikační hodnoty pro kritérium významu poruchy (vady) S [10] .....	25
Tab 5)	Klasifikační hodnoty pro kritérium výskytu způsobu poruchy (vady) O [10] .....	25
Tab 6)	Klasifikační hodnoty pro kritérium odhalitelnosti poruchy (vady) D [10] .....	25
Tab 7)	Příklad vyhodnocení priority rizika metodou RPN a ERPN [8] .....	26
Tab 8)	Společnost SMC ve faktech [23] .....	40
Tab 9)	Náležitosti obsažené v inspekčním listu .....	42
Tab 10)	Náležitosti obsažené v ročním plánu údržby .....	42
Tab 11)	Parametry automatického soustruhu CNC .....	44
Tab 12)	Klasifikační hodnoty pro kritérium významu poruchy (vady) S .....	45
Tab 13)	Klasifikační hodnoty pro kritérium výskytu způsobu poruchy (vady) O .....	45
Tab 14)	Klasifikační hodnoty pro kritérium odhalitelnosti poruchy (vady) D .....	46
Tab 15)	Prvky obráběcího stroje s vysokou hodnotou rizikového čísla RPN .....	47
Tab 16)	Seznam součástí vnějšího pohledu automatického soustruhu CNC .....	51
Tab 17)	Seznam součástí schématu komponentů automatického soustruhu CNC .....	52
Tab 18)	Seznam součástí schématu nástrojové zóny automatického soustruhu CNC .....	53

## 8 SEZNAM PŘÍLOH

CD s obsahem:

- Bakalářská práce ve formátu PDF  
*Bakalářská práce – Proaktivní systém údržby strojů (Petr Semotam).pdf*
- Tabulka FMEA automatického soustruhu CNC ve formátu PDF  
*FMEA – tabulka.pdf*
- Diagram FMEA automatického soustruhu CNC ve formátu PDF  
*FMEA – diagram.pdf*
- Podpůrné výkresy částí CNC stroje analýzy FMEA ve formátu PDF  
*FMEA – schéma – vnější pohled.pdf*  
*FMEA – schéma – komponenty.pdf*  
*FMEA – schéma – pracovní jednotky.pdf*